

Koel- en scherm perspectieven van het Klimrekscherm

H.F. de Zwart





WAGENINGEN **UR**

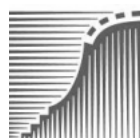
For quality of life

Koel- en scherm perspectieven van het Klimrekscherm

H.F. de Zwart

© 2009 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Wageningen UR Glastuinbouw



**landbouw, natuur en
voedselkwaliteit**

Projectnummer WUR Glastuinbouw: 3240314000

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Bornsesteeg 65, 6708 PD Wageningen
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen
Tel. : 0317 - 48 60 01
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

	pagina
Korte samenvatting	1
Inleiding	3
1 Metingen aan het Klimrekscherm	5
2 Meetresultaten en modelvorming	9
2.1 Lichtmetingen	9
2.1.1 Doorlatendheid voor PAR en NIR	9
2.1.2 Haze	10
2.2 Energieonttrekking aan de kas	10
3 Energetisch en teeltkundig perspectief van het Klimrekscherm	15
3.1 De regeling van het Klimrekscherm	15
3.2 Effect van het Klimrekscherm in de tomatenteelt	19
3.3 Effect van het Klimrekscherm in de potplantenteelt	22
4 Economische bespiegelingen	27
5 Conclusies	31
6 Samenvatting	35
Literatuur	37
Bijlage I. Kas en teeltbeschrijving Tomaat	2 pp.
Bijlage II. Kas en teeltbeschrijving Ficus	1 p.

Korte samenvatting

Het Klimrekscherm is een door Sjaak van Dijk ontwikkeld systeem waarbij een met water besproeid foliescherm overdag zorgt voor kaskoeling en het scherm bovendien het licht in de kas meer diffuus maakt. Diffuus licht is voor een kas groeizamer, maar omdat een folie altijd ook licht onderschept is de lichtsom onder het scherm een beetje kleiner. Bij veel (direct) licht levert het scherm voordeel, maar bij lage lichtintensiteiten en bij buitenlicht dat al diffuus is kan het scherm beter in de cassette opgeborgen blijven.

Behalve voor de verbetering van de lichtkwaliteit is het Klimrekscherm ook bedoeld om vanuit het zomerse warmteoverschot duurzame energie te verzamelen in de vorm van opgewarmd water. De energie in dit opgewarmde water kan dan in een aquifer worden bewaard voor gebruik via een warmtepomp in de winter. De onttrekking van warmte aan de kas in de zomer gebeurt door koud water op het folie te sproeien en levert daarmee enige koeling. Hierdoor wordt het gemakkelijker om een hoge CO₂-concentratie aan te houden.

Om de perspectieven van het Klimrekscherm te bepalen heeft Wageningen UR glastuinbouw in de zomer van 2008 metingen verricht aan een proefkas waarin dit scherm, inclusief de sproei-installatie was gemonteerd. De metingen en rapportage zijn gefinancierd door het Productschap Tuinbouw en het Ministerie van Landbouw Natuur en Voedselkwaliteit in het kader van het onderzoeksprogramma Kas Als Energiebron.

De meetresultaten zijn gebruikt om door middel van een simulatiemodel het jaarrond perspectief van zo'n Klimrekscherm in de tomatenteelt en in een ficusteelt te berekenen.

De conclusie uit deze analyse is dat het Klimrekscherm zoals dat in de proefkas was gemonteerd in staat is om voldoende warmte voor de regeneratie van een aquifer in de tomaten en in de potplantenteelt te realiseren. In de tomatenteelt zal er daarbij echter een kleine productiedaling optreden maar in de ficusteelt een beperkte productiestijging. Deze conclusies voor wat betreft het productie-effect gelden voor de foliematerialen die in 2008 in de proefkas gemonteerd waren. Als de uitvloeijing van waterdruppels verbetert of als het scherm een goede selectieve reflectie van Nabij Infrarode Straling realiseert zullen de conclusies gunstiger worden.

De koelcapaciteit van het Klimrekscherm ligt rond de 100 W/m², wat behaald wordt bij een kasluchttemperatuur van 27°C, een RV van 85% en een opwarming van het koelwater van 10 naar 19°C. Als de kaslucht waarbij de koeling moet werken lager ligt dan deze 27°C en als de gemiddelde temperatuur van het op en afstromende water hoger wordt gekozen loopt de koelcapaciteit terug met ongeveer 10% per °C.

In vergelijking met andere koelsystemen met een koelcapaciteit van 100 W/m² zijn de jaarkosten van het Klimrekscherm ongeveer 1 euro lager dan een systeem dat bijvoorbeeld gebaseerd is op luchtbehandelingskasten. In de tomatenteelt zal een koelsysteem gebaseerd op luchtbehandelingskasten echter een duidelijker productie- verhogend effect opleveren zodat (bij de in dit experiment toegepaste folies) in de tomatenteelt het Klimrekscherm niet het eerst aangewezen systeem zal zijn voor de ontwikkeling van semigesloten kassen.

Voor de teelt van tropische potplanten in een kas met een dubbel dek (bijv. Ficus), waar lichttoetreding iets minder gewicht in de schaal legt, laat het Klimrekscherm een voordeel zien boven een koelsysteem gebaseerd op lucht-circulatie.

Het algemene bedrijfseconomisch perspectief van energieverzameling uit zomerse warmteoverschotten ten behoeve van de verwarming van kassen in de winter laat echter terugverdientijden zien in de orde van 8 jaar. De vraag of die systemen zijn gebaseerd op een Klimrekscherm of op een ander koelsysteem geven hier maar zeer kleine veranderingen op (ordegrootte één of twee maanden).

Deze terugverdientijd geldt ten opzichte van een referentie waarin de kas met een ketel wordt verwarmd. Ten opzichte van een referentie waar gebruik wordt gemaakt van een WKK-installatie is de terugverdientijd nog langer omdat de warmteprijs in een WK-kas laag is.

Voor teelten waarin de inzet van koude een absolute noodzaak is (zoals bij Phalaenopsis of bij Freesia en Alstroemeria (wortelkoeling)) wordt een verwarmingssysteem op basis van een warmtepomp pas interessant wanneer een hoge gasprijs samen gaat met een lage elektriciteitsprijs.

Inleiding

Het overvloedige aanbod van zonne-energie maakt dat kassen in de zomer al gauw te maken hebben met een groot warmteoverschot. Als dit overschot in z'n geheel zou worden geoogst komt er een hoeveelheid warmte beschikbaar die een veel meer is dan de warmtebehoefte voor de verwarming van kassen. In het transitieproces voor de verduurzaming van de Nederlandse glastuinbouw is dan ook niet de beschikbaarheid van duurzame energie het probleem, maar vooral de goedkope verzameling en opslag van de duurzame energie.

De kosten voor deze warmteverzameling worden beperkt door de gebruikte installaties zo goedkoop mogelijk te maken, maar vooral ook door teeltkundig voordeel te behalen uit de warmteonttrekking aan de kas. Een kas die gekoeld wordt heeft minder te maken met temperatuurextremen en kan bij CO₂-dosering hogere binnenconcentraties realiseren door de beperking van het ventilatieverlies.

Het Klimrekscherm-concept heeft alle kenmerken van de ontwikkeling van goedkope warmte-verzamelingssystemen, zoals de focus op lage materiaal- en installatiekosten, lage stroomverbruiken en een koelende werking op het kasklimaat, maar voegt daar nog de mogelijkheid om de lichtkwaliteit in de kas te verbeteren aan toe. Wanneer het te gebruiken folie tot een vergrote haze-factor leidt wordt het binnenkomende licht gunstiger voor de plantengroei. Het zou zelfs mogelijk zijn om het folie van spectraal selectieve coatings te voorzien zodat de NIR-straling zou kunnen worden gereflecteerd, maar er is op dit moment geen informatie over het effect van de bevoeiing van het scherm op deze spectrale eigenschappen.

De beloften van het Klimrekscherm zijn met al deze aspecten perspectiefrijk zodat er alle reden is om door middel van metingen te achterhalen in hoeverre deze met de op dit moment beschikbare materialen in de praktijk gerealiseerd kunnen worden. De metingen zijn uitgevoerd in een proefkas van 20 bij 20 meter.

In het voorliggend rapport wordt eerst de uitvoeringsvorm van het scherm, de theorie achter de verwachte eigenschappen en de meetopstellingen waarmee deze eigenschappen geverifieerd zullen worden besproken.

In Hoofdstuk 2 worden de meetresultaten gepresenteerd en wordt er uiteengezet hoe deze verwerkt zijn in rekenmodellen die de eigenschappen van het scherm in willekeurige omstandigheden kunnen voorspellen.

In Hoofdstuk 3 wordt het energetisch en teeltkundig perspectief van het scherm met de inmiddels bekende eigenschappen doorgerekend voor een tweetal gewassen (Tomaat en Ficus). Alle berekeningen worden gemaakt ten opzichte van een referentie, namelijk de gangbare situatie zonder actieve koeling. Er worden berekeningen gemaakt aan de hand van de schermkarakteristieken zoals die in de proefkas zijn bepaald, maar door de onderliggende effecten uiteen te rafelen kan ook een doorzicht worden verkregen naar het effect van verbeteringen in de schermmaterialen (bijvoorbeeld folies met een zeer goed werkende anticondens coating).

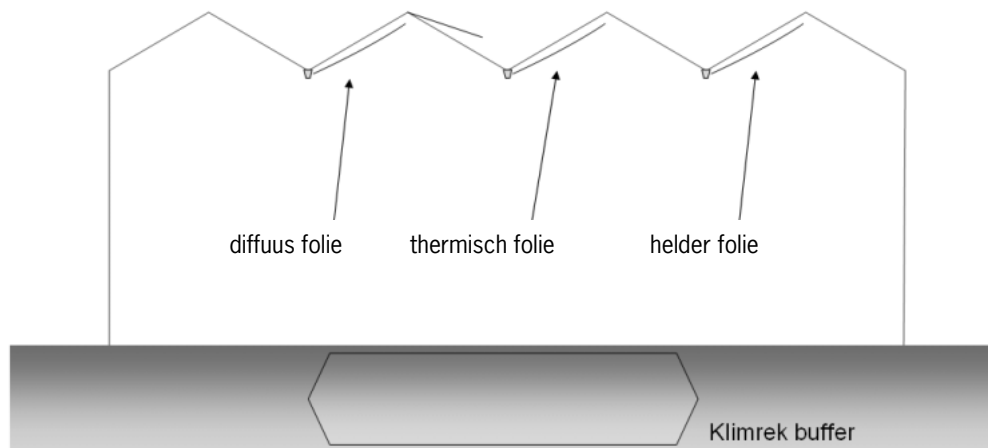
In Hoofdstuk 4 worden de economische aspecten belicht. Hierbij komen zowel de operationele kosten en opbrengsten als de investeringskosten aan bod.

Hoofdstuk 5 behandelt de conclusies die uit dit onderzoek gemaakt kunnen worden.

De werkzaamheden in dit onderzoek zijn mogelijk gemaakt door financiering vanuit het Productschap Tuinbouw en het Ministerie van Landbouw Natuur en Voedselkwaliteit in het kader van het onderzoeksprogramma Kas Als Energiebron.

1 Metingen aan het Klimrekscherm

Achter het komkommerbedrijf van Sjaak van Dijk is een proefkas gebouwd waarin geëxperimenteerd wordt met de verschillende concepten die door de firma Klimrekscherm worden ontwikkeld. Het is een kas van 20x20 meter bestaande uit 4 kappen van 5 meter en ook 4 vakken van 5 meter.



Figuur 1.1. Schets van de Klimrekkas met onder de vloer de Klimrekbuffer.

Het Klimrekscherm is een concept waarin in opgeborgen toestand stukken folie opgerold liggen in cassetes die vlak onder de goot gemoneerd zijn. Als de kas door de instraling van de zon te warm wordt kunnen de folies uitgerold worden tot vlak onder de nok van de kas. Vanuit het bovenste profiel kan het folie dan worden besproeid met koud water. De helft van het kasdek wordt dan een koud dakvlak waardoor de kas gekoeld kan worden. Met dit koelen van het kasdek wordt koud water opgewarmd tot temperaturen in de buurt van de kasluchttemperatuur waardoor het systeem een aquifer zou kunnen regenereren. Onder de kas is ook nog een etmaalbuffer beschikbaar, uitgevoerd als de zogenaamde Klimrekschermbuffer. Dit is een groot ondergronds warmteopslagsysteem, bedoeld voor etmaalbuffering van laagwaardige warmte. In het experiment kon uit deze watervoorraad water ten behoeve van de koeling van de kas worden gehaald.

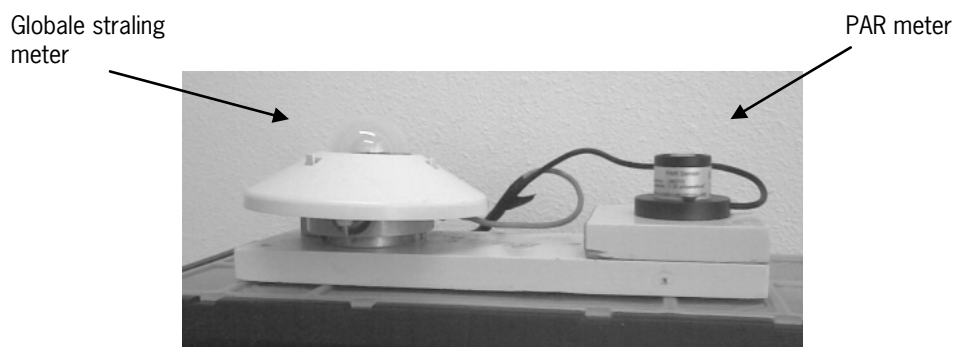
De kas is uitgevoerd met drie verschillende folie-types met verschillende optische eigenschappen. Het eerste folie heeft een grote haze-factor, waardoor direct licht in een meer diffuse vorm in de kas wordt gebracht. Het tweede folie is een zogenaamde thermische folie. Dit materiaal heeft een lage emissiecoëfficiënt voor langgolvlige straling (thermisch infra rood), bedoeld om het nachtelijke warmteverlies in foliekassen te beperken. Het derde folie is een zeer helder folie waardoor verwacht wordt dat de licht-onderschepping van dit folie lager zal zijn dan dat van de andere folies.

Ten behoeve van de bepaling van de licht-doorlatendheidseigenschappen van de folies is gebruik gemaakt van twee identieke meetsets zoals afgebeeld in Figuur 1.2.

Deze stralingsmeters worden aangesloten op een dataloger die de gemiddelde waarde van het signaal per 10 sec meet en vastlegt. Vooraf aan de meetprocedure worden de beide meetsets buiten naast elkaar geplaatst en wordt enige tijd gemeten. De door de meters gemeten lichtintensiteit is gedurende die periode gelijk zodat de meters op elkaar geïkht kunnen worden. Daarna wordt één van de meetsets naar binnen in de kas meegenomen. De waarde van de meting in de kas in vergelijking met het signaal dat op hetzelfde moment buiten wordt gemeten is een maat voor de lichttransmissie van de kas.

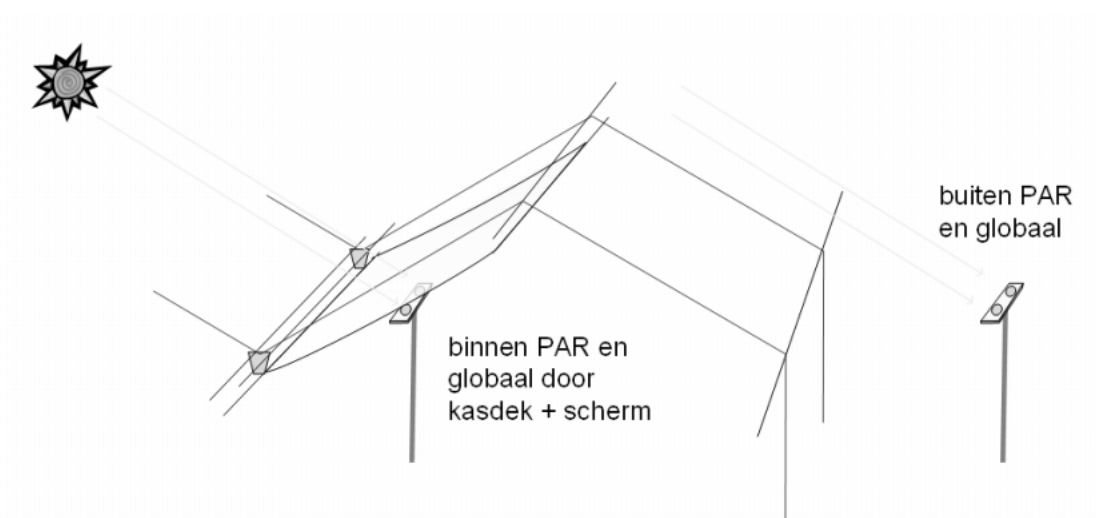
Zoals te zien in Figuur 1.2 bestaat elke meetset uit twee sensoren. De globale stralingsmeter meet de totale hoeveelheid zonlicht en de PAR sensor alleen het voor de plantengroei relevante deel. Omdat de totale hoeveelheid zonlicht bestaat uit PAR, NIR en een klein beetje UV kan, wanneer de UV component wordt verwaarloosd, de NIR-intensiteit worden berekend uit het verschil tussen Globale straling en PAR-straling.

Op deze manier kan met onderstaande meetset zowel de PAR als de NIR transmissie worden bepaald.



Figuur 1.2. Meetset waarmee de lichttransmissie-metingen zijn uitgevoerd.

De lichttransmissie metingen zijn uitgevoerd onder de drie folies door de binnen-meter vlak onder het folie te houden. Figuur 2.3 toont waar er precies gemeten is.



Figuur 1.3. Meetset waarmee de lichttransmissie-metingen zijn uitgevoerd.

De dakvlakken waarin de folies gemonteerd zijn zitten aan de zuidzijde van de kas. Ze zijn immers onder andere bedoeld om de directe straling om te zetten naar meer diffuus licht. Gedeeltelijk gebeurt dit door de materiaaleigenschappen, maar dit gebeurt vooral doordat er tijdens gebruik water op gesproeid wordt. Dit maakt dat er druppeltjes op en onder het folie ontstaan die het zonlicht in allerlei richtingen breken.

Ter bepaling van de lichtdoorlatendheid is de binnen-sensor vlak onder de drie folies gehouden en is de lichtintensiteit over een lijn, parallel aan de goot bepaald.

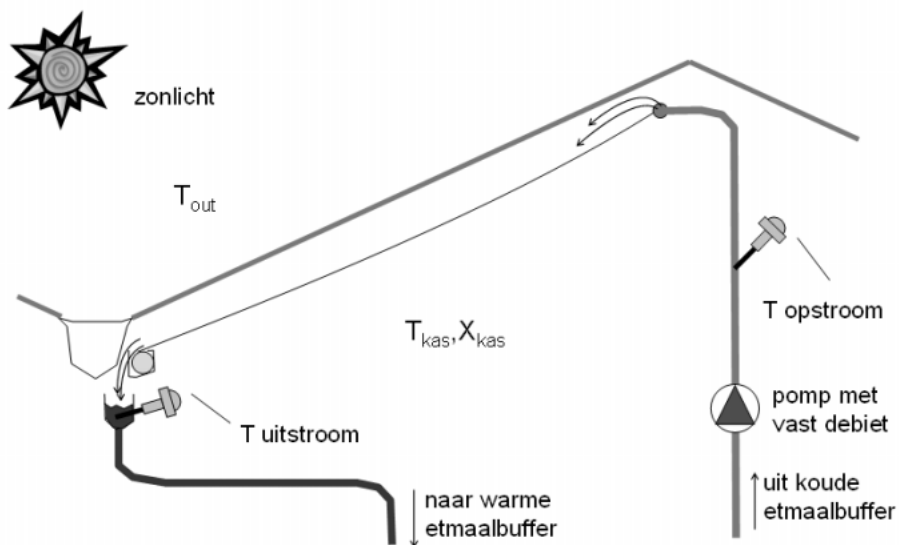
De bovenbeschreven procedure is voor de drie materialen (zie Figuur 1.1) uitgevoerd, zowel voor schermen in een droge toestand als schermen in een natte toestand.

Voor de beschrijving van de metingen aan de warmteverzamelingscapaciteit van het Klimrekscherm wordt gebruik gemaakt van de schets in Figuur 1.4.

De installatie is een open systeem. Het koude water wordt op het folie gesproeid waarna het afstroomt en onderaan in een bakje wordt opgevangen. Een pomp zorgt voor de benodigde opvoerdruk en deze bedraagt ongeveer 1.2 bar (0.7 bar voor de benodigde opvoerhoogte en 0.5 bar over de sproeiers).

Het beschikbare debiet lag tussen de 4.0 en 4.7 kg per m² kas per uur (een beetje verschillend per sproeibuis). Het uitstroom-debiet is gemeten aan de uittrede-kant van het systeem. Omdat het een open systeem is hoeft het uitstroom-debiet niet precies gelijk te zijn aan het opstroom debiet. Er kan waterdamp in het water condenseren en het water dat aan de onderkant van het scherm vanuit de kaslucht condenseert komt eveneens als warm water in het opvangbakje terecht. De hoeveelheid water die er door condensatie en verdamping bij komt is echter klein ten opzichte van het sproeidebiet (volgens het simulatiemodel minder dan 1%) dus deze nuance wordt verder buiten beschouwing gelaten.

In de toevoerleiding is een temperatuursensor gemonteerd en de temperatuur van het uitstromende water werd gemeten in het opvangbakje bij de uitstroom-opening.



Figuur 1.4. Metingen waarmee de warmteverzamelingscapaciteit is bepaald.

De proefaccommodatie bij Sjaak van Dijk beschikt niet over een koelmachine. De temperatuur van het water dat op het folie kan worden gespoten is dus helemaal afhankelijk van het water dat beschikbaar is in de buffer. Tijdens de metingen op 1 juni 2008 bleek dit water 20°C en was daarmee 10°C warmer dan de temperatuur waarmee het systeem beoogd is te werken. Door echter de kasluchttemperatuur ook veel verder op te laten lopen dan de uiteindelijke werktemperatuur voor het systeem kon toch gemeten worden bij de te verwachten temperatuurverschillen tussen water en kaslucht.

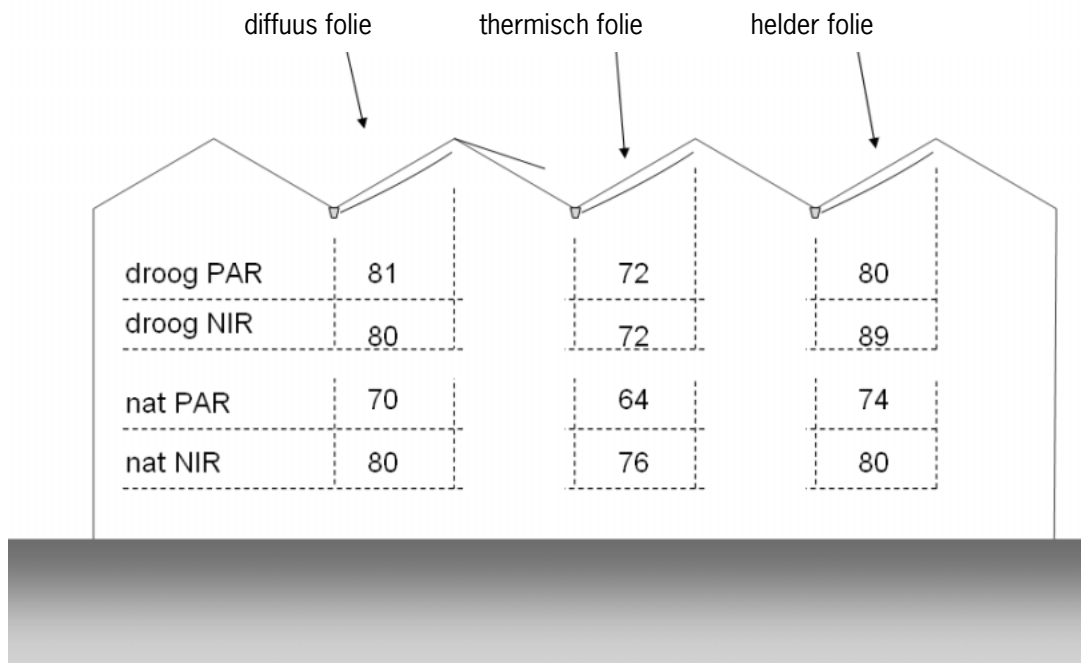
2 Meetresultaten en modelvorming

2.1 Lichtmetingen

2.1.1 Doorlatendheid voor PAR en NIR

Anders dan bij gebruikelijke lichttransmissie-metingen in kassen, waar het vooral gaat om de doorlatendheid voor diffuus licht, is het Klimrekscherm bedoeld als diffusor en als warmte-uitwisselend vlak tijdens het koelen van de kas. De lichttransmissiegegevens moeten dus juist bij direct zonlicht worden uitgevoerd.

Daarom zijn de metingen uitgevoerd op een stralende dag (1 juni 2008). In onderstaande figuur zijn de verkregen resultaten getoond.



Figuur 2.1. Resultaten van de lichtdoorlatendheidsmetingen voor licht (direct + diffuus) door de zuid-kappen met drie verschillende folie-materialen.

De meetresultaten leiden tot een aantal belangrijke conclusies.

1. De thermische folie heeft een duidelijk lagere lichtdoorlatendheid dan de andere folietypen.
2. Het heldere folie is qua doorlatendheid van PAR (van belang voor de gewasgroei) niet noemenswaardig anders dan het diffuserende folie. Omdat de doorlatendheid voor NIR groter is is de doorlatendheid voor de energie uit zonlicht onder deze folie wel wat groter. Het lijkt dus of het heldere folie is geoptimaliseerd voor de totale zonlicht doorlatendheid en niet voor de doorlating van zichtbaar licht.
3. Wanneer het folie nat is verslechtert de doorlatendheid voor PAR licht bij alle materialen aanzienlijk. Tijdens het sproeien met water komen er overal op het folie waterdruppels (door het sproeien en door condensvorming). Deze druppels reflecteren licht waardoor de doorlatendheid van de dakvlakken voor PAR met 7 tot 13% afneemt (6 to 11%-punten). In natte toestand geeft het heldere folie de beste lichtdoorlatendheid voor PAR.

4. Het sproeien met water heeft veel minder effect op de doorlatendheid van NIR. De dakvlakken met natte folies laten allemaal goed vergelijkbare hoeveelheden NIR-straling door.

Alle metingen bij elkaar nemend kan worden geconcludeerd dat, indien gekozen zou moeten worden uit de op dit moment voor handen zijnde materialen, het heldere folie de beste keus zou zijn voor de toepassing van het Klimrekscherm. Er mag verwacht worden dat bij gebruik van het scherm al gauw ook de bevoeiing zal worden aangezet zodat de gegevens in de natte toestand het meest bepalend zijn. In de natte toestand scoort het heldere folie het beste voor de PAR-doorlaat. Het diffuserend effect, wat een voordeel zou kunnen zijn van het diffuse folie ten opzichte van het heldere folie zal bij een bevoeid scherm voor een groot deel door de druppels gerealiseerd worden zodat de 4%-punten hogere PAR-doorlatendheid zal opwegen tegen de wellicht iets lagere haze-factor.

De bovengetoonde lichttransmissie van 80% voor de kap met het heldere folie is het gecombineerde effect van de kas-omhulling plus het folie van het Klimrekscherm. Er zijn geen metingen van de lichtdoorlatendheid van de zuidgevel onder deze lichtomstandigheden zonder folie. Er wordt daarom aangenomen dat de gemeten lichttransmissie van 80% is opgebouwd uit een 89% transmissie van bovenste laag (het kasdek) en 90% transmissie voor PAR licht. Voor de transmissie van NIR van het schermfolie wordt 94% gehanteerd.

Zodra het scherm in de simulatieberekeningen wordt dichtgetrokken worden de bovengenoemde percentages op de lichtintensiteit toegepast. Als het scherm ook nog wordt bevoeid dan wordt er additioneel 8% van de PAR-intensiteit en 10% van de NIR intensiteit afgehaald.

2.1.2 Haze

De haze-factor van een materiaal is de mate waarin direct licht wordt omgezet in diffuus licht. Wanneer een lichtmeter in een kas met een hoge haze-factor wordt gemeten zal de gemeten intensiteit niet veel afnemen wanneer het directe zonlicht met een klein schaduw-gevend plaatje wordt afgeschermd.

In het experiment bij Sjaak van Dijk is dit gedaan door het effect van de beschaduwing van de globale straling sensor met een klein zwart plaatje op een afstand van een halve meter van de sensor te meten.

Op een strak blauwe dag levert zo'n beschaduwing in de buitenlucht een terugval van de gemeten intensiteit van 75%. In de Klimrekschermkas met bevoeide folies was de terugval in gemeten intensiteit slechts 40%, wat inhoudt dat in de kas 60% van het licht diffuus licht is.

In een standaard-kas is de fractie diffuus licht midden op de dag zo'n 40% dus het gebruik van een bevoeid Klimrekscherm geeft een duidelijke verbetering van de diffusiviteit van het licht.

In de berekeningen met KASPRO wordt de invloed van de haze meegenomen door op de momenten dat het Klimrekscherm bevoeid wordt de verhouding diffuus/direct zodanig te veranderen dat de fractie diffuus niet onder de bovengenoemde 60% komt.

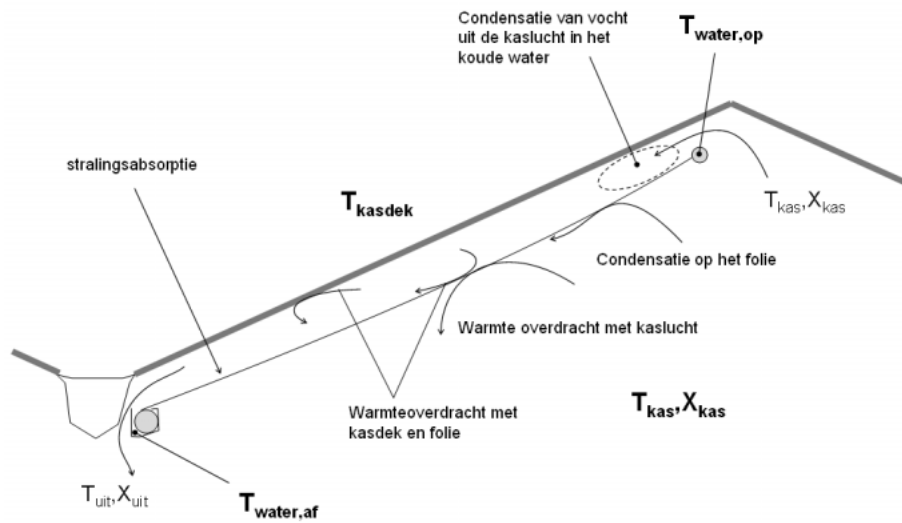
2.2 Energieonttrekking aan de kas

Als het Klimrekscherm naar de nok getrokken is en met koud water wordt bevoeid dan zal de kaslucht gekoeld worden aan het koude (halve) dakvlak. Het water zal hierbij opwarmen zodat met het koelen van de kas direct warmte vanuit het zomerse overschot kan worden onttrokken. In Figuur 2.2 zijn alle warmte- en stofoverdrachtsprocessen die hierbij plaatsvinden schematisch in kaart gebracht. Er vindt een beetje stralingsabsorptie op het folie plaats, maar deze hoeveelheid is gering omdat het folie dun en goed lichtdoorlatend is. Er vindt condensatie plaats vanuit de kaslucht tegen de onderkant van het kasdek, maar ook zal er een beetje lucht aan de ovenkant tussen het scherm en het kasdek stromen waaruit vocht direct in het koude water zal condenseren. Het is overigens tijdens de metingen gebleken dat de hoeveelheid lucht die aan de onderkant tussen de spleet uitstroomt heel erg

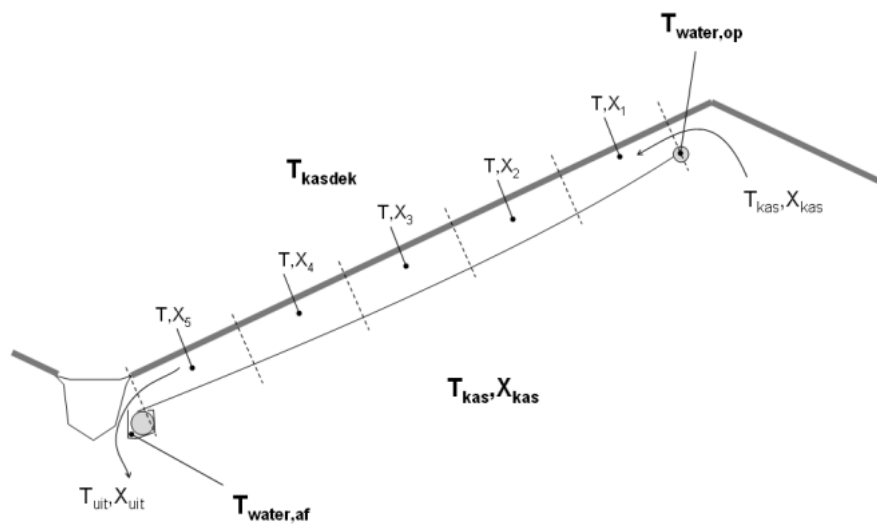
klein is (er was bijna geen luchtstroom te voelen). Bovendien is dit vanuit theoretisch oogpunt ook nauwelijks te verwachten omdat de lucht aan de onderkant opgewarmd wordt door het naar beneden stromende water (waarvan wordt beoogd dat het opwarmt).

Het overgrote deel van de energie-opname van het water vanuit de kaslucht komt dus door de warmte-uitwisseling en condensatie vanuit de kaslucht tegen de onderkant van het folie.

Alle warmte-overdrachtsprocessen die daarbij plaatsvinden (stralingsuitwisseling, condensatiewarmte en convectieve uitwisseling) kunnen worden beschreven als functie van de scherm-temperatuur. Omdat deze processen niet-lineair zijn (met name de condensatie) wordt in het simulatiemodel het scherm opgedeeld in 5 segmenten die allemaal een eigen scherm-temperatuur hebben. Omdat het koelwater vanaf de bovenzijde aanstroomt is het bovenste segment het koudst en het onderste segment het warmst. Deze segmentering is afgebeeld in Figuur 2.3.

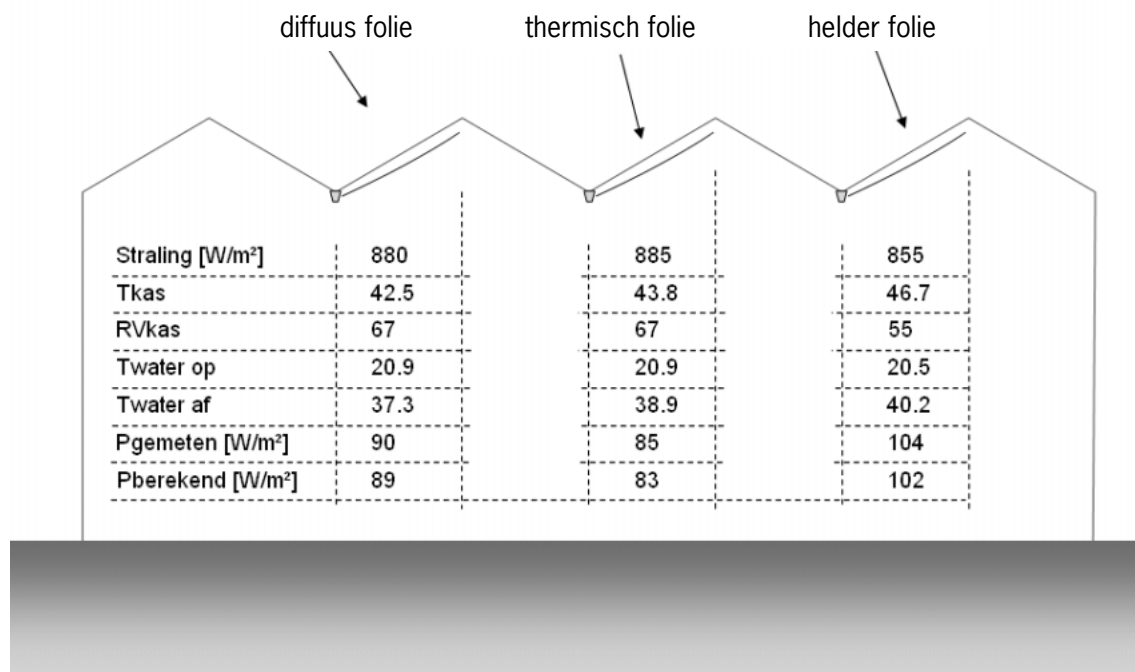


Figuur 2.2. Warmteoverdrachtsprocessen rond het Klimrekscherm.



Figuur 2.3. Het scherm opgedeeld in 5 segmenten.

De bovenbeschreven fysische processen rond het Klimrekscherm zijn al eerder in een model gevat, namelijk ten behoeve van de eerder gemaakte Quick Scan (de Zwart 2008, Quickscan naar de koel- en bevochtigingscapaciteit van het bevoeid Klimrekscherm, rapport in opdracht van Syntens). Wanneer het toen ontwikkelde model wordt toegepast op de meetgegevens die op 1 juni 2008 zijn verzameld worden de onderstaande resultaten verkregen.



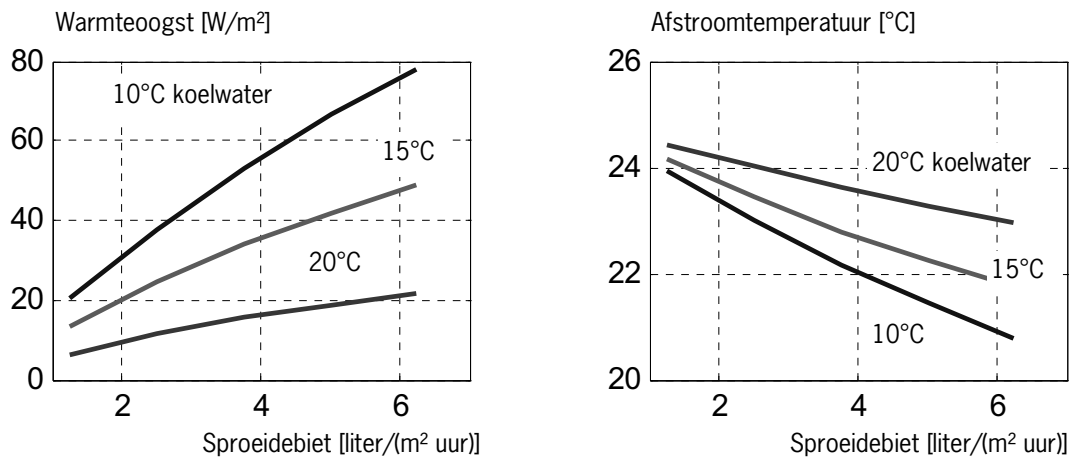
Figuur 2.4. Meetresultaten van de meetsessie op 1 juni 2008, aangevuld met het door het simulatiemodel berekend warmteoogst vermogen van het Klimrekscherm. De weergegeven vermogens zijn uitgedrukt per m² kasoppervlak. (Omdat het scherm maar de halve kap bedekt zijn de vermogens per m² scherm dus twee maal zo groot.) De getoonde stralingsintensiteit is de intensiteit die buiten de kas is gemeten.

De data in Figuur 2.4 laten zien dat de omstandigheden waaronder gemeten is niet representatief zijn voor gemiddelde kasomstandigheden. De kasluchttemperatuur is evenwel tot de getoonde hoge temperaturen opgevoerd omdat het beschikbare koelwater niet kouder was dan 20°C. Het temperatuurverschil tussen aanvoerwater en kaslucht ligt daardoor rond de 25°C. Dit is iets groter dan in de praktijk gebruikt zal worden (daar zal het meestal rond de 18 tot 20°C liggen), maar is bewust zo gekozen om een behoorlijke opwarming van het koelwater te kunnen verkrijgen. Ook het dampdrukverschil tussen de kaslucht en het scherm-oppervlak (de drijvende kracht achter de condensatie) is in de bovengetoonde situatie vergelijkbaar met die in gebruikelijke kascondities waarbij een kas van ongeveer 28°C en 80% RV wordt gekoeld met water van 10°C.

De gemeten en berekende warmteverzameling stemmen zeer goed overeen en er kan dan ook worden geconcludeerd dat het eerder ontwikkelde simulatiemodel voor het Klimrekscherm, dat helemaal op de theoretische beschrijving van de warmte-overdrachtsprocessen is gebaseerd, een zeer goede representatie van de werkelijkheid onder willekeurige omstandigheden geeft.

Figuur 2.5 toont de resultaten van dit model in de vorm van een effectanalyse van verschillende sproeidebieten en verschillende opstroomende watertemperaturen op de warmte-oogst en het afstroomdebiet bij kasluchtomstandigheden die representatief zijn voor zomerse situaties waarin de koeling in werking moet treden. Alle lijnen in

Figuur 2.5 gelden per m² kasoppervlak dus de prestaties per strekkende meter Klimrekscherm zijn 4 keer zo groot (uitgaande van een 4 meter kap).



Figuur 2.5. Energie-oogst en afstroomtemperatuur van een Klimrek scherm als functie van het sproeidebiet onder kas-omstandigheden bij verschillende temperaturen van het opstroomende water. De stralingsintensiteit van de zon is 400 W/m² en de kasluchttemperatuur is 27°C en heeft een luchtvochtigheid van 75%.

Ten behoeve van de beschrijving van het persepectief van het Klimrekscherm bij jaarrond gebruik in verschillende teelten is de modelmatige beschrijving van het scherm in KASPRO geïmplementeerd.

Bij deze implementatie wordt het scherm op twee manieren gestuurd. In de eerste besturingsstrategie wordt het scherm gebruikt om een maximale warmteverzameling te realiseren. In dat geval wordt het scherm opgetrokken indien de kasluchttemperatuur boven de ventilatietemperatuur uit komt. Als de temperatuur daarna nog een graad hoger is uitgekomen dan wordt ook de bevoeiing van het scherm ingeschakeld. Deze eerste strategie leidt tot veel schermuren.

In de tweede strategie wordt het scherm alleen gebruikt als de kas niet alleen te warm is, maar als er ook veel (direct) licht aanwezig is. Bij deze strategie wordt beoogd het scherm alleen te gebruiken op momenten dat de koelende en diffuserende werking een groter positief effect op de fotosynthese heeft dan het negatieve effect van de grotere lichtonderschepping.

In het volgende hoofdstuk worden de resultaten van de jaarrond simulaties met beide strategieën voor een tomatenteelt en een potplantenteelt getoond.

3 Energetisch en teeltkundig perspectief van het Klimrekscherm

Met een verklarend simulatiemodel voor het gedrag van het Klimrekscherm in handen kunnen vergelijkende studies worden gedaan naar het effect van dit koelsysteem op het gebied van de verzameling van duurzame energie (het energetisch perspectief) en de betekenis voor de teelt. De betekenis voor de teelt omvat het gecombineerde effect van de verschuiving van direct naar diffuus licht, de verlaging van de totale hoeveelheid licht en de verhoging van de CO₂-concentratie ten gevolge van het verminderde ventilatieverlies van CO₂.

Al deze effecten worden in detail bestudeerd en becommentarieerd voor een tomatenteelt. Daarnaast worden dezelfde berekeningen gemaakt voor een potplantenteelt (Ficus), maar voor deze laatste twee teelten worden de resultaten minder diepgaand besproken omdat de achterliggende mechanismen niet verschillen voor die in de tomatenteelt. De beschrijvingen van de 2 teelten zijn vastgelegd in de bijlagen.

3.1 De regeling van het Klimrekscherm

Het Klimrekscherm beoogt het verlies van CO₂ door ventilatie in een kas die door de zon overmatig verwarmd wordt te beperken. Het scherm bereikt dit door de warmtebelasting van de kas wat te verlagen (er komt een extra licht reflecterend vlak aan de zuidkant van de kas) en door koeling van dit halve dakvlak middels koud water. Bij deze koeling ontstaat er condens aan de onderkant van het scherm en komen er druppels aan de bovenkant waardoor de lichtdoorlatendheid van de kas vermindert, maar het licht wel sterk wordt gediffuseerd.

Omdat het gebruik van het scherm en de bevoeiing niet een onverdeeld voordeel opleveren wordt het scherm met enige terughoudendheid gebruikt.

Er zijn twee varianten doorgerekend. In de eerste variant wordt het scherm vooral gebruikt om duurzame energie te verzamelen vanuit het overschot aan zonnewarmte in de zomer. In die berekeningen wordt het scherm gesloten als de kasluchttemperatuur iets boven de ventilatielijn is gekomen. Concreet betekent dit dat het scherm wordt opgetrokken als de kasluchttemperatuur 0.5°C boven de ventilatielijn ligt. Bij een P-band van 5°C betekent dit dat het scherm wordt opgetrokken als de ramen 10% geopend zijn.

Wordt het ondanks de schermende werking in de kas warmer, wat in zomerse omstandigheden zeker het geval zal zijn, dan wordt de bevoeiing aangezet. Dit gebeurt als de kasluchttemperatuur meer dan 1°C boven de ventilatietemperatuur komt. Bovenstaande criteria betekenen dat het Klimrekscherm in een standaard tomatenteelt 2800 uur per jaar opgetrokken is en daarvan 2200 uur bevoeid wordt

In de tweede strategie wordt het scherm veel minder frequent gebruikt, namelijk alleen op het moment dat er meer dan 500 W/m² globale straling is. Wanneer het criterium op dat niveau gelegd wordt blijkt namelijk maximaal geprofiteerd te kunnen worden van het voordeel van de koeling en de diffuserende werking van het scherm ten opzichte van het nadeel van de wat hogere lichtonderschepping ten gevolge van het extra scherm. Het aantal schermuren bedraagt dan 810 uur, waarvan 800 uur bevoeid.

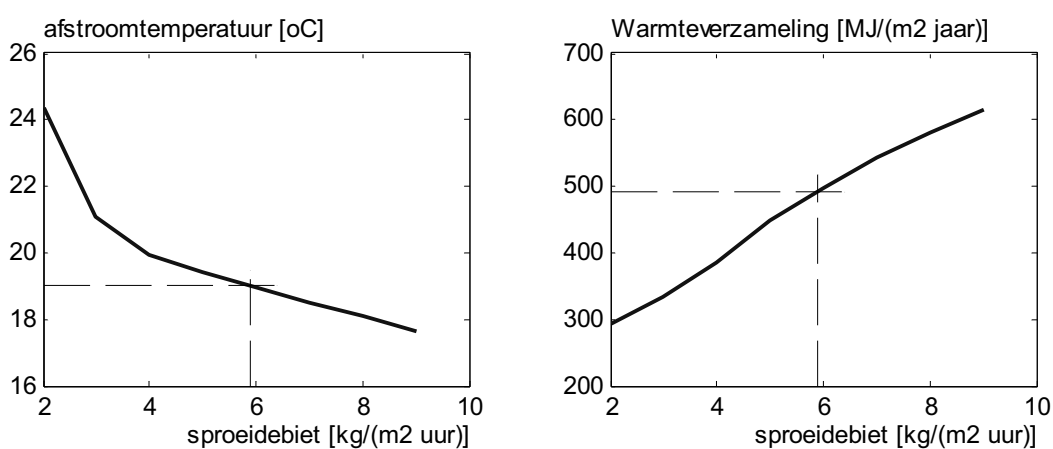
Het bevoeien van het scherm beoogt niet alleen het koelen van de kas, maar tegelijkertijd ook het verzamelen van zonnewarmte ten behoeve van het gebruik daarvan in de winter. Hiervoor is in de winter overigens altijd een warmtepomp nodig omdat het temperatuurniveau waarop het water vanuit de aquifer weer naar boven wordt gehaald altijd te laag is om een kas te verwarmen.

Omdat deze warmte in een seizoensbuffer moet worden opgeslagen (aquifer) is het van belang dat de gemiddelde afstroomtemperatuur niet te laag wordt. Dit kan worden gerealiseerd door het sproeidebiet te beperken.

In Figuur 3.1 wordt de relatie tussen het sproeidebiet en de gemiddelde afstroomtemperatuur getoond in geval het scherm in eerste instantie wordt ingezet als systeem om zomerse warmte-overschotten te verzamelen ten behoeve van de winter. Deze figuur geldt voor de in bijlage I beschreven tomatenteelt.

Bij bestudering van de linker en rechter grafiek in Figuur 3.1 blijkt dat er een zekere spanning bestaat tussen het verzamelen van warmte en het realiseren van een hoge afstroomtemperatuur. Het streven naar een hoge afstroomtemperatuur (te realiseren door een beperking van het sproeidebiet) gaat ten koste van de warmte-oogst.

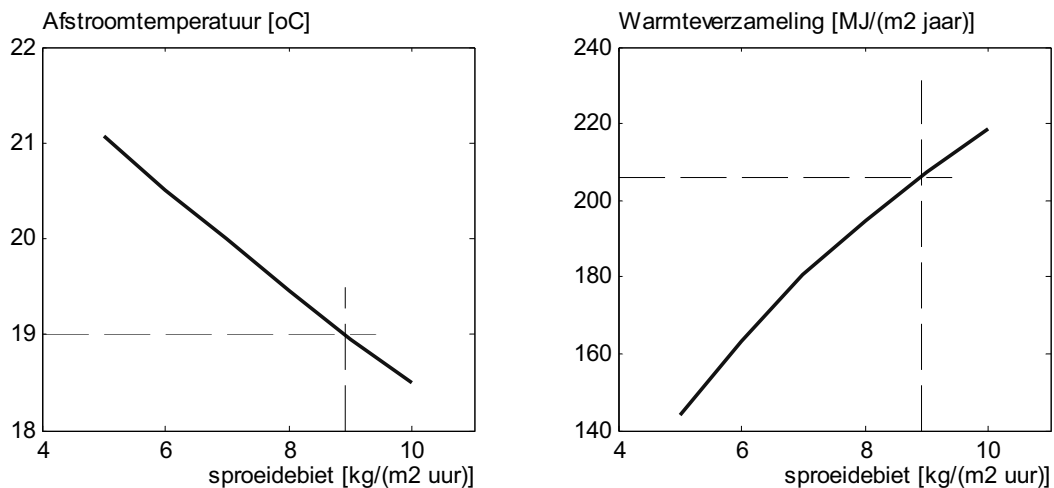
Uit de grafiek kan worden afgelezen dat indien er gestreefd wordt naar een gemiddelde afstroomtemperatuur van 19°C de sproei-installatie van het Klimrekscherm 5.9 liter water per m² kas per uur moet kunnen versproeien. Bij een kapbreedte van 4 meter betekent dit een sproeidebiet van $5.9 \cdot 4 = 23.6$ liter per strekkende meter Klimrekscherm.



Figuur 3.1 Relatie tussen gemiddelde afstroomtemperatuur en het sproeidebiet (linker grafiek) en de jaarlijkse warmteverzameling als functie van het sproeidebiet. Indien wordt gestreefd naar een gemiddelde afstroomtemperatuur van 19°C dan moet een sproeidebiet van 5.9 liter/(m² uur) worden gekozen. Het scherm wordt bevoeid zodra de kasluchttemperatuur 1°C boven de ventilatielijn komt. Op jaarbasis resulteert dit in een warmteverzameling van 490 MJ per m² kas per jaar.

Eenzelfde figuur kan worden gemaakt voor de andere gebruikswijze van het scherm, namelijk wanneer het scherm alleen wordt gebruikt op momenten dat het positieve effect van de koeling in voldoende mate opweegt tegen de negatieve effecten van het scherm (met de eigenschappen zoals in de proef-opstelling gemeten).

Figuur 3.2 laat zien dat in dat geval een hoger sproeidebiet kan worden gekozen (het is in de kas in die 800 uur gemiddeld warmer dan wanneer het scherm gedurende 2200 uur bevoeid wordt).



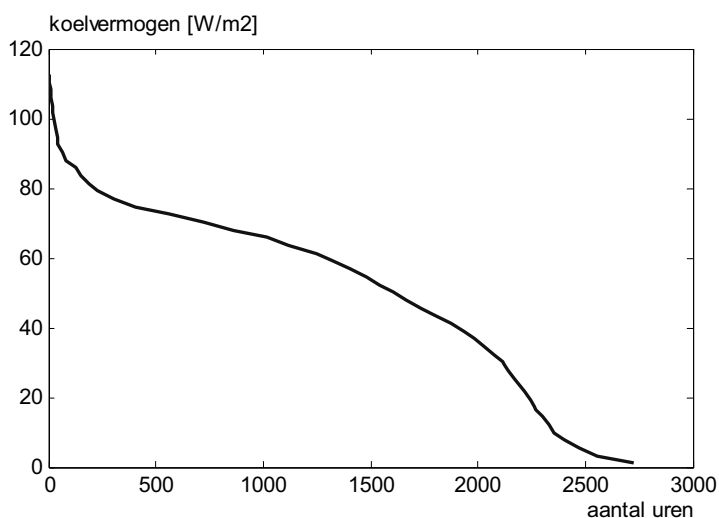
Figuur 3.2. Relatie tussen gemiddelde afstroomtemperatuur en het sproeidebiet (linker grafiek) en de jaarlijkse warmteverzameling als functie van het sproeidebiet bij gebruik van het scherm bij een lichtintensiteit van 500 W/m^2 of meer. Indien wordt gestreefd naar een gemiddelde afstroomtemperatuur van 19°C dan moet een sproeidebiet van $9 \text{ liter/(m}^2 \text{ uur)}$ worden gekozen. Op jaarbasis resulteert dit in een warmteverzameling van $205 \text{ MJ per m}^2 \text{ kas per jaar}$.

In het eerste geval (de situatie met 2200 sproei-uren) versproeit het systeem op jaarbasis 13 m^3 water per m^2 kas. Bij een pompdruk van 1.2 bar vereist dit een elektrisch vermogen van ongeveer 1 kWh zodat geconcludeerd kan worden dat het elektriciteitsverbruik van het systeem erg laag is. In het tweede geval is het sproeidebiet weliswaar hoger, maar is het aantal uren fors minder zodat er nog geen 6 liter per m^2 per jaar wordt versproeid en het daarvoor benodigde elektriciteitsverbruik helemaal verwaarloosbaar is.

De 490 MJ die het Klimrekscherm verzameld heeft vertegenwoordigt 15.5 m^3 aardgas equivalenten aan warmte. Indien deze warmte met een warmtepomp in temperatuur wordt opgewerkt levert dit ongeveer 20 m^3 aardgas equivalenten aan warmte (een warmtepomp met een COP van 4) en een elektriciteitsverbruik van 45 kWh per m^2 per jaar. Indien deze elektriciteit met een WK-installatie zou worden opgewekt dan is hiervoor 13 m^3 aardgas nodig. De warmte-output van de warmtepomp en de afvalwarmte van de WKK leveren samen 27 m^3 aardgas equivalenten aan warmte zodat geconcludeerd kan worden dat de warmteverzameling via het Klimrekscherm genoeg is om te voorzien in de regeneratiebehoefte van de aquifer in een tomatenteelt zoals die beschreven is in het rapport 'Richtinggeevende Toekomstbeelden'.

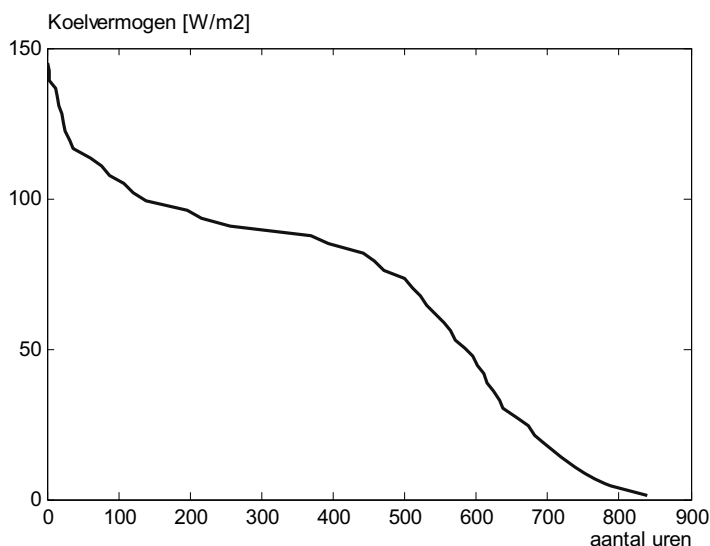
De energiebesparing die met het Klimrekscherm kan worden behaald is in principe gelijk aan de hoeveelheid warmte die er op jaarbasis mee wordt verzameld. Bij een maximaal gebruik van het scherm (dus bij bevloeiing zodra de kasluchttemperatuur 1°C boven de kasluchttemperatuur uitkomt) bedraagt deze 490 MJ, wat overeenkomt met 15.5 m^3 aardgas equivalenten per jaar.

De onderstaande grafiek toont het koelvermogen waarmee het Klimrekscherm de 490 MJ/m² per jaar verzamelt.



Figuur 3.3. Jaarbelastingkromme van het koelvermogen van het Klimrekscherm bij een sproeidebiet van 5.9 liter water per m² per uur met een temperatuur van 10°C. Het scherm wordt bevoeid zodra de kasluchttemperatuur meer dan 1°C boven de ventilatielijn uit komt.

Indien de andere gebruikswijze van het scherm wordt bekeken, dus wanneer het scherm alleen wordt gebruikt bij een lichtintensiteit boven de 500 W/m², dan is het aantal gebruiksuren veel lager, maar het koelvermogen gemiddeld hoger. Dit komt vooral doordat het waterdebiet hoger is, maar ook de gemiddeld hogere kasluchttemperatuur in de periden met veel licht speelt mee.



Figuur 3.4. Jaarbelastingkromme van het koelvermogen van het Klimrekscherm bij een sproeidebiet van 9 liter water per m² per uur met een temperatuur van 10°C. Het scherm wordt bevoeid als er meer dan 500 W/m² zonlicht wordt gemeten.

3.2 Effect van het Klimrekscherm in de tomatenteelt

Het effect van het gebruik van een Klimrekscherm op de teelt volgt uit het gecombineerde effect van de verhoogde CO₂-concentratie, de verlaagde overall lichttransmissie en de verhoogde diffusiviteit.

Indien de gemeten lichttransmissie-effecten (zie § 2.1) op jaarbasis met KASPRO worden doorgerekend dan blijkt dat in geval het scherm maximaal wordt gebruikt (dus bij optrekken zodra de kasluchttemperatuur boven de ventilatietemperatuur uit komt) de lichtsom die in de periode van 1 maart tot 1 september in de kas wordt gemeten daalt van 2200 MJ/m² per jaar naar 2080 MJ/m² per jaar. Dit is dus een verlaging van de totale hoeveelheid licht met 5.5%. Als het scherm uitsluitend bij licht-intensiteiten boven de 500 W/m² wordt gebruikt dan is de vermindering van de lichthoeveelheid slechts 60 MJ per m² per jaar en is de totale lichthoeveelheid dus slechts 2.7% lager dan in een kas zonder scherm.

Naast de verlaging van de hoeveelheid licht leidt het scherm echter ook tot een andere verdeling van het beschikbare licht tussen diffuus en direct. In de standaard situatie is er in de periode van 1 maart tot 1 september 1530 MJ/m² diffuus licht in de kas. Bij het intensieve gebruik van het Klimrekscherm bedraagt de hoeveelheid diffuus licht wat meer, namelijk 1590 MJ/m² en ook bij het extensieve gebruik van het Klimrekscherm is er nog een toename van de hoeveelheid diffuus licht ten opzichte van de referentie, namelijk naar 1585 MJ/m².

De vermindering van de hoeveelheid licht heeft dus uitsluitend betrekking op een afname van het directe licht. Bij intensief gebruik van het scherm neemt de hoeveelheid direct licht af met 180 MJ/m² en als het scherm uitsluitend bij veel zon gebruikt wordt neemt de hoeveelheid direct licht af met 115 MJ/m².

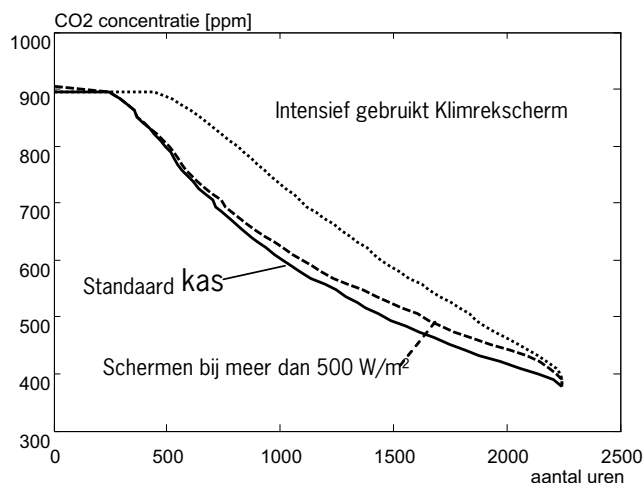
Door deze verschuiving in de lichtkwaliteit wordt het effect van de verlaagde lichttransmissie op de jaarlijkse fotosynthese sterk beperkt. Hieraan wordt verderop nadere aandacht gegeven.

Behalve dat het Klimrekscherm invloed heeft op de lichtsituatie in de kas leidt het gebruik uiteraard ook tot een hogere CO₂-concentratie omdat er minder geventileerd hoeft te worden. De mate van effect hangt samen met de beschikbaarheid van CO₂. Bij een grote doseercapaciteit zal het effect van verminderde ventilatie kleiner zijn dan bij een kleine doseercapaciteit.

In de praktijk heeft de doseercapaciteit alles te maken met de warmtevraag en de wijze waarop die wordt ingevuld. Door het gebruik van WKK, levering van elektriciteit aan het openbare net en vernietiging van een deel van de vrijkomende warmte worden in de huidige praktijk dosseerniveaus van 150 kg/(ha uur) tot 250 kg/(ha uur) gerealiseerd.

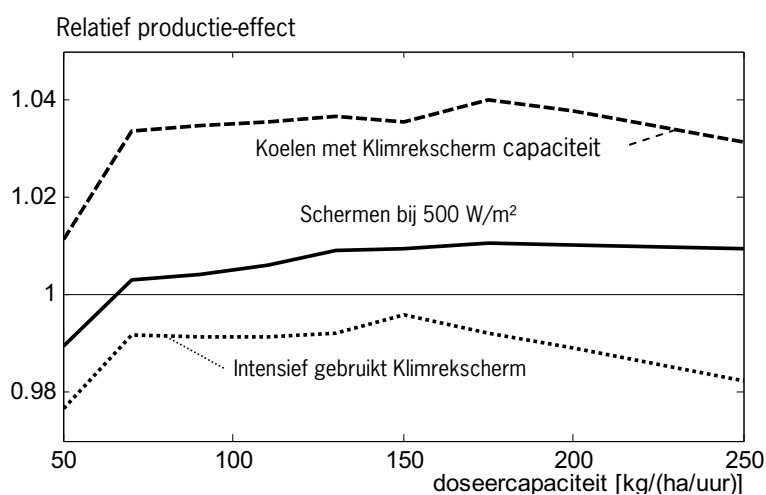
Indien er wordt gewerkt met een installatie die voor een belangrijk deel op duurzame energie werkt, en er bovendien gebruik wordt gemaakt van energiezuinige instellingen zal rookgas CO₂ slechts zeer beperkt voor handen zijn en zeker niet in hoge capaciteiten. Daarom is de analyse met betrekking tot het effect van koeling op de CO₂-concentratie in de kas gebaseerd op een doseercapaciteit van 125 kg per ha per uur.

De volgende figuur laat de jaarbelastingduurkromme van de CO₂-concentraties van de uren waarop er meer dan 100 W/m² straling buiten de kas wordt gemeten voor de situaties met een en intensief gebruikt Klimrekscherm, de situatie met een extensief gebruik van het scherm (dus uitsluitend bij meer dan 500 W/m² globale straling) en voor de referentiesituatie zonder scherm.



Figuur 3.5. Jaarbelastingduurkromme van de CO₂-concentratie in een kas met een intensief gebruikt Klimrekscherm (bovenste lijn), een extensief gebruikt Klimrekscherm (middelste lijn) en een standaard kas (onderste lijn). In alle gevallen wordt uitgegaan van een doseercapaciteit van 125 kg zuivere CO₂ per ha per uur. Bij het intensief gebruikte scherm wordt bevoeid met 5.9 liter water per m² per uur en bij het extensief gebruikte scherm wordt met 9 liter per m² per uur gesproeid. Het sproeiwater heeft een temperatuur van 10°C.

Tegenover de daling van de lichtdoorlaat bij gebruik van het Klimrekscherm staat dus naast de verschuiving van het licht-aanbod in de richting van diffuus licht ook een (beperkte) stijging van de CO₂-concentratie. De resultante van die twee effecten leidt tot een productie-effect dat afhankelijk is van de CO₂-dosering. Figuur 3.6 laat het resulterend effect bij de beide gebruikswijzen van het scherm zien als relatieve productie ten opzichte van een referentie zonder Klimrekscherm, als functie van de doseercapaciteit (met zuivere CO₂). Alle overige factoren zijn gelijk gehouden.



Figuur 3.6. Relatief effect van twee gebruikswijzen van het Klimrekscherm en het effect van een koelinstallatie met gelijke koelcapaciteit als het Klimrekscherm op de gewasproductie in een tomatenteelt als functie van de doseercapaciteit met zuivere CO₂. De lijnen geven het relatieve effect ten opzichte van een referentiekas waarin alle overige parameters gelijk zijn. De lijnen zijn een gevolg van het positieve effect van de koeling (en daardoor de verhoogde CO₂-concentratie), maar voor de onderste twee lijnen wordt dit positieve effect (deels) weer opgeheven door de lichtonderschepping van het scherm, ondanks de verhoogde diffusiviteit.

Figuur 3.6 laat zien dat ingeval het scherm intensief gebruikt wordt voor de verzameling van duurzame energie de jaarproductie in alle gevallen lager uit komt dan in de referentie. Blijkbaar weegt de hogere CO_2 -concentratie (zie Figuur 3.5) meestal niet op tegen de verminderde lichttoetreding, ondanks het feit dat het licht wat meer diffuus is. De vorm van de grafiek is interessant. Bij lage doseercapaciteiten is de hoeveelheid CO_2 die toegediend kan worden te laag om een groot profijt van de koeling te kunnen hebben. Bij hoge doseercapaciteiten neemt het effect van de koeling op een gegeven moment weer af omdat bij een grote capaciteit ook zonder koeling de CO_2 -concentratie vaak hoog kan worden gehouden.

In Figuur 3.7 zijn de bijdragen van de vier factoren die het effect van het Klimrekscherm op de productie bepalen uiteengezet. De uiteenrafeling is gemaakt binnen een 5-tal licht-klassen om te illustreren dat het gewicht van die verschillende effecten niet constant is. Uiteraard is de lichtintensiteit niet de enige klassificering die aangebracht kan worden, maar zaken als CO_2 -concentratie en kasluchttemperatuur zijn wel sterk aan de lichtintensiteit gecorreleerd. Het negatieve effect van de extra lichtonderschepping is opgedeeld in twee componenten, namelijk de lichttransmissiebeperking van het materiaal op zich en de additionele beperking ten gevolge van de extra reflectie door condensdruppels.

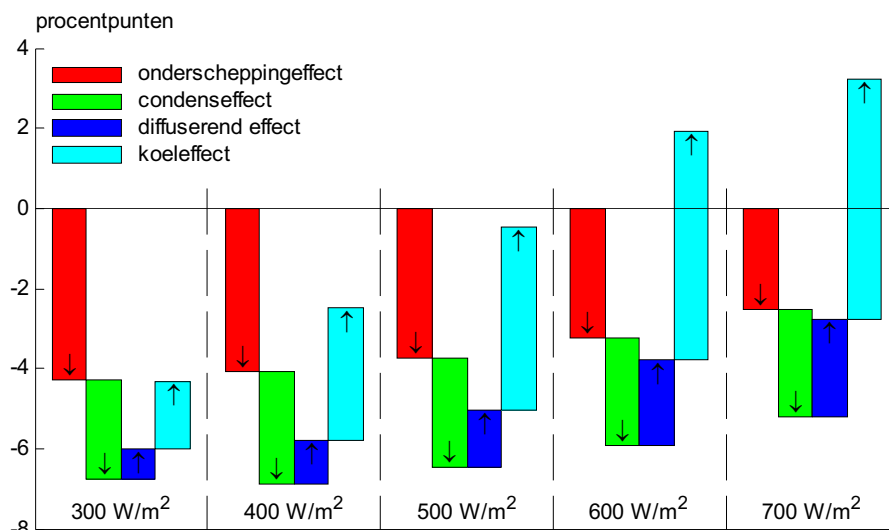
De belangrijkste lijn die uit Figuur 3.7 te is destileren is de constatering dat bij lage lichtintensiteiten de nadelen van het scherm overheersen, maar dat bij hogere lichtintensiteiten (vanaf 600 W/m^2) de voordelen van het scherm domineren. Het toenemende effect door de diffuserende werking komt simpelweg doordat er bij toenemend licht vooral meer direct licht is, wat door de diffuserende werking wordt omgezet.

De afname van de last van de lagere lichtdoorlatendheid met een hoger lichtaanbod komt door de niet-lineariteit van de fotosynthese respons (de fotosynthesecurve vlakkt af bij toenemend licht), maar ook omdat bij toenemend licht andere factoren (temperatuur en vooral CO_2 -concentratie) de beperkende factoren worden. Dit geeft gelijk de achtergrond van de duidelijke toename van het effect van de koeling.

Figuur 3.7 helpt ook om de drie lijnen die in Figuur 3.6 zijn getoond te verduidelijken. De bovenste lijn in Figuur 3.6 is het jaarrond resultaat van uitsluitend het koeffect. Het gebruik van koelers met een capaciteit zoals het Klimrekscherm geeft dus bij lage licht-intensiteiten bijna 2% productieverhoging en bij hoge intensiteiten ruim 6% verhoging van de fotosynthese. Gemiddeld genomen leidt zo'n koelcapaciteit volgens Figuur 3.6 dus tot 4% productieverhoging indien de CO_2 -doseercapaciteit $175 \text{ kg}/(\text{ha uur})$ bedraagt.

De onderste lijn van Figuur 3.6 laat zien dat een intensief gebruik van het Klimrekscherm tot een daling van de productie leidt. Dit is met het inzicht van Figuur 3.7 niet verwonderlijk omdat er op jaarbasis meer uren zijn waarop er minder dan 600 W/m^2 licht is dan uren waarop er meer dan 600 W/m^2 licht is.

De middelste lijn van Figuur 3.6 is een gevolg van een veel selectievere omgang met het scherm. Als het scherm alleen op uren met meer dan 500 W/m^2 gebruikt wordt dan krijgen de uren met een positief effect ruimschoots de overhand en wordt het netto resultaat dus positief. Het totaal aantal uren waarop het scherm gebruikt wordt is in dat geval echter niet zo groot zodat op jaarbasis de productietoename niet boven de 1% uit komt.



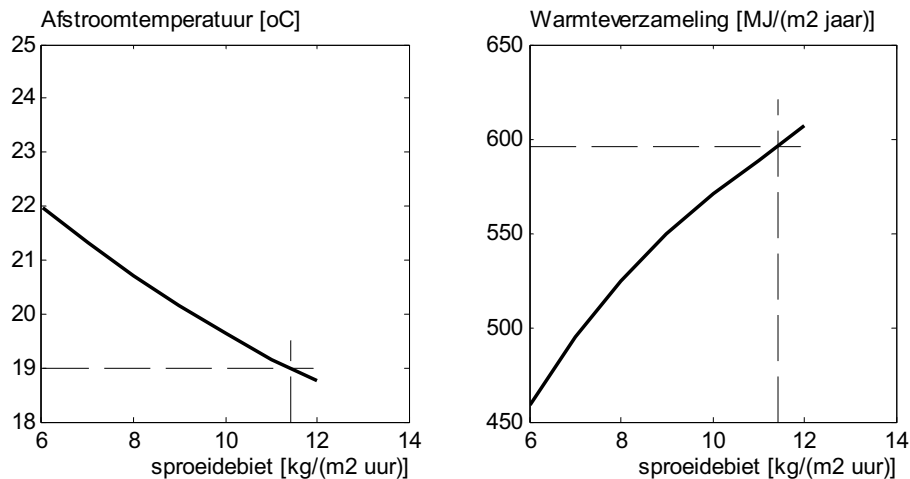
Figuur 3.7. Uiteenrafeling van de verschillende effecten van het Klimrekscherm op de fotosynthese van een tomatengewas. In elk blokje wordt een stapeling van opwaartse en neerwaartse effecten getoond. Het eindpunt van een rijtje van 4 effecten is het overall resulterend effect in de bewuste lichtintensiteit-klasse (300 W/m² beslaat 250 tot 350 W/m² etc.) De berekeningen zijn gemaakt bij een CO₂-doseercapaciteit van 150 kg/m² en een sproeidebiet van 7 liter per m² kas per uur.

3.3 Effect van het Klimrekscherm in de potplantenteelt

Soortgelijke analyses als gemaakt voor de tomatenteelt kunnen ook worden gemaakt voor de potplantenteelt. Bezien vanuit het Klimrekscherm is het belangrijkste verschil tussen de potplanten en de tomatenteelt dat de kasluchttemperatuur en de gemiddelde luchtvochtigheid in de beschouwde teelt (Ficus) wat hoger is en dat het belang van een hoge lichtdoorlatendheid bij een potplantenteelt wat kleiner is.

Zoals te lezen in Bijlage II, waar de uitgangspunten van de teelt vastgelegd zijn, wordt er bij deze teelt ook uitgegaan van het gebruik van een dubbelwandig kasdek. In combinatie met een Klimrekscherm, betekent dit enerzijds een lagere lichttoetreding naar de kas, en dus een lager warmte-aanbod, maar aan de andere kant zal door het dubbele dek de temperatuur van het waterlaagje op het folie hoger kunnen worden. De verliezen, vooral het verlies door condensatie tegen het kasdek, zullen immers kleiner zijn. Ook de gemiddeld hogere luchtvochtigheid onder een dubbelwandig kasdek helpt bij een grotere opwarming van het sproeiwater.

In Figuur 3.8, die geheel analoog is aan Figuur 3.1 valt dan ook direct op dat de warmteverzameling vanuit een ficusteelt onder een dubbelwandig dek hoger is dan in de tomatenteelt (600 MJ/m² per jaar in plaats van 490 MJ/m²) en dat het sproei-debiet aanzienlijk hoger moet zijn wanneer de warmte op een gemiddelde temperatuur van 19°C wordt verzameld (11.5 liter/(m² uur) in plaats van 5.9 liter/(m² uur)).



Figuur 3.8. Relatie tussen gemiddelde afstroomtemperatuur en het sproeidebiet (linker grafiek) en de jaarlijkse warmteverzameling als functie van het sproeidebiet in de Ficusteelt. Indien wordt gestreefd naar een gemiddelde afstroomtemperatuur van 19°C dan moet een sproeidebiet van 11.5 liter/(m² uur) worden gekozen. Het scherm wordt bevoeid zodra de kasluchttemperatuur 1°C boven de ventilatielijn komt. Op jaarbasis resulteert dit in een warmteverzameling van 590 MJ per m² kas per jaar.

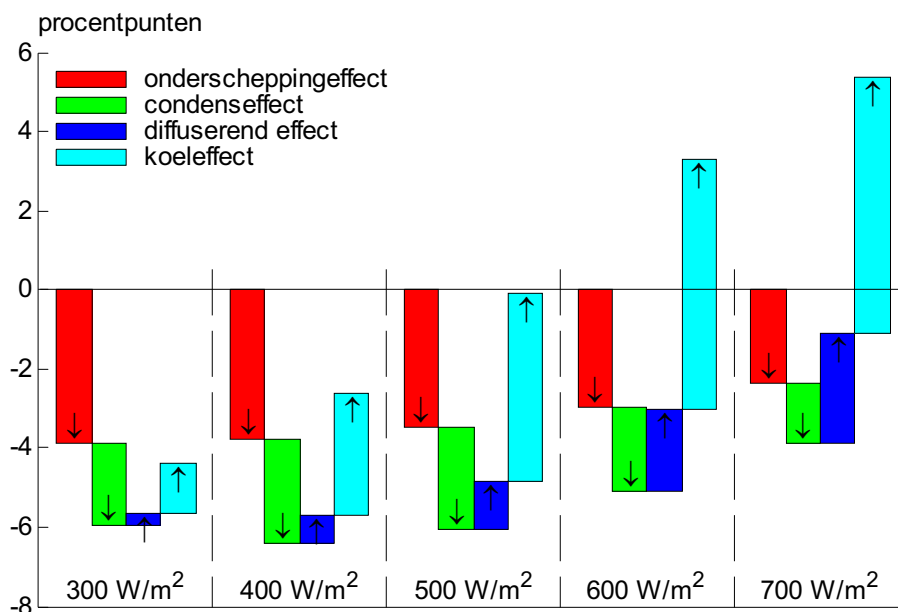
Het hogere sproeidebiet dat onder het dubbelwandige dek in de potplantenteelt gebruikt kan worden komt behalve doordat de verliezen wat minder zijn ook doordat in de potplantenteelt het scherm minder uren wordt opgetrokken en bevoeid. Waar het scherm in de tomatenteelt 2200 uur bevoeid wordt is dit in de potplantenteelt slechts 1400 uur.

Behalve de gebruikswijze die bij het plaatje hierboven gehanteerd is kan ook voor de potplantenteelt worden onderzocht of bij een andere gebruikswijze van het scherm een gunstiger verhouding tussen de voordelen van de koeling en de nadelen van de extra lichtonderschepping verkregen kan worden.

Ter illustratie van de onderlinge verhouding van de verschillende effecten van het scherm in de potplantenteelt is in Figuur 3.9 de analyse van deze 4 effecten, analoog aan Figuur 3.7 getoond.

De trends in de effecten blijken gelijk aan die in de tomatenteelt, maar in absolute zin zijn de licht-effecten wat kleiner en de koel-effecten duidelijk groter.

Het omslagpunt tussen een overall nadeel naar een overall voordeel ligt ook bij de potplantenteelt tussen de 500 en 600 W/m². De gebruikswijze van het Klimrekscherm die het grootste teeltkundige voordeel oplevert blijkt in de potplantenteelt dan ook gelijk te zijn aan de gebruikswijze die in de tomatenteelt het beste effect opleverde. Dit betekent dat bij de teeltkundig optimale gebruikswijze van het scherm er pas geschermd en gekoeld wordt bij een buitenlicht intensiteit van 500 W/m² of meer.



Figuur 3.9. Uiteenrafeling van de verschillende effecten van het Klimrekscherm op de fotosynthese in een ficusteelt. In elk blokje wordt een stapeling van opwaartse en neerwaartse effecten getoond. Het eindpunt van een rijtje van 4 effecten is het overall resulterend effect in de bewuste lichtintensiteitsklasse (300 W/m² beslaat 250 tot 350 W/m² etc.) De berekeningen zijn gemaakt bij een CO₂-doseercapaciteit van 125 kg/m² en een sproeidebiet van 11 liter per m² kas per uur.

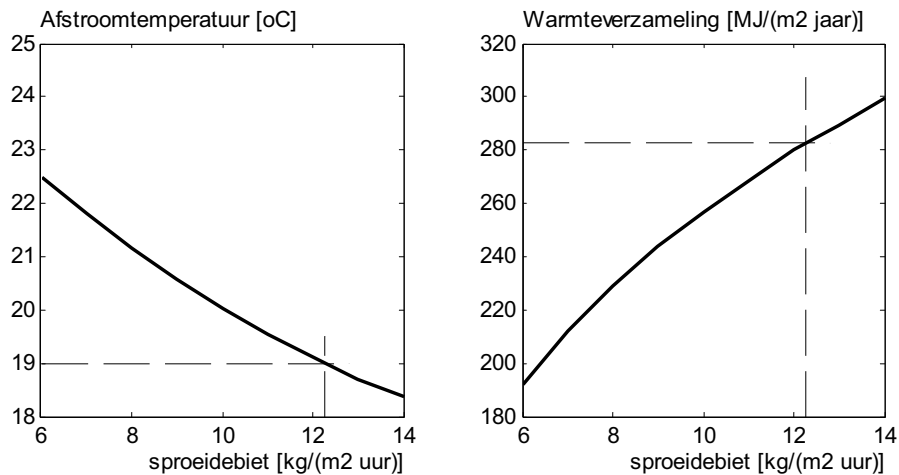
Indien het Klimrekscherm pas bij 500 W/m² bevoeid wordt daalt de warmteverzameling en kan er een hoger sproeidebiet worden gekozen om het water gemiddeld op 19°C te krijgen. Dit wordt getoond in Figuur 3.10.

Het veel kleiner aantal gebruiksuren (750 uur in plaats van 1400 uur) maakt dat de warmteverzameling meer dan halveert (van 590 naar 285 MJ/m² per jaar).

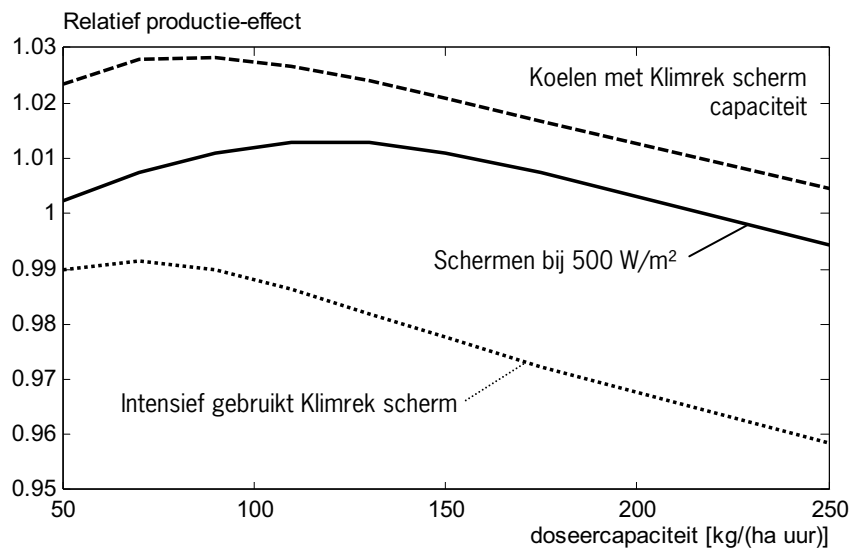
In Figuur 3.11 wordt tenslotte nog het effect van de het Klimrekscherm op de relatieve productie in de periode van maart t/m september getoond, als functie van de doseercapaciteit van de zuivere CO₂. Deze figuur is dus analoog aan Figuur 3.6.

Figuur 3.11 laat zien dat bij een doseercapaciteit van 125 kg/(ha uur) het effect van het Klimrekscherm bij een vanuit gewaskundig oogpunt optimale gebruikwijze (sluiten bij 500 W/m²) het grootst is en resulteert in een productietoename van iets meer dan 1%. Wanneer het Klimrekscherm met de lichtonderscheppings-eigenschappen zoals die in de proefkas gemeten zijn wordt gebruikt om maximaal duurzame energie te oogsten zal dit gepaard gaan met een productieverlies van 1 tot 2%.

Een koelsysteem dat dezelfde koelprestaties levert als het Klimrekscherm maar geen enkel effect heeft op de lichthoeveelheid en samenstelling leidt tot een productiestijging van rond de 2%.



Figuur 3.10. Relatie tussen gemiddelde afstroomtemperatuur en het sproeidebiet (linker grafiek) en de jaarlijkse warmteverzameling als functie van het sproeidebiet bij gebruik van het scherm bij een lichtintensiteit van 500 W/m^2 of meer. Indien wordt gestreefd naar een gemiddelde afstroomtemperatuur van 19°C dan moet in de Ficusteelt een sproeidebiet van $12.5 \text{ liter/(m}^2 \text{ uur)}$ worden gekozen. Op jaarbasis resulteert dit dan in een warmteverzameling van $285 \text{ MJ per m}^2 \text{ kas per jaar}$.



Figuur 3.11. Relatief effect van twee gebruikswijzen van het Klimrekscherm en het effect van een koelinstallatie met gelijke koelcapaciteit als het Klimrekscherm op de gewasproductie in een ficusteelt als functie van de doseercapaciteit met zuivere CO_2 . De lijnen geven het relatieve effect ten opzichte van een referentiekas waarin alle overige parameters gelijk zijn. De lijnen zijn een gevolg van het positieve effect van de koeling (en daardoor de verhoogde CO_2 -concentratie), maar voor de onderste twee lijnen wordt dit positieve effect (deels) weer opgeheven door de lichtonderschepping van het scherm, ondanks de verhoogde diffusiviteit.

4 Economische bespiegelingen

De berekeningen uit hoofdstuk 3 laten zien dat het Klimrekscherm bij een intensief gebruik zou kunnen voorzien in de regeneratiebehoefte van een kas die met een warmtepomp, in combinatie met een WK-installatie wordt verwarmd. In dit soort, op het gebruik van duurzame energie gebaseerde systemen, onttrekt een warmtepomp ten behoeve van een tomatenteelt rond de 450 MJ per m² per jaar aan de aquifer (Poot *et al.*). In een potplanten kas met een dubbel kasdek zal de regeneratiebehoefte zo'n 400 MJ per m² zijn dus de warmteverzamelingspotentie van het Klimrekscherm is ook in de potplantenteelt ruim voldoende.

Volgens het rapport 'Richtinggevende beelden' kan het gebruik van een warmtepomp het gasverbruik met ongeveer 11 m³ laten dalen. Het gasverbruik van een op een energiezuinige wijze gebruikte kas daalt dan van 27 m³ naar 16 m³ per m² per jaar. In een wat minder energiezuinig gebruikte kas kan een warmtepomp een wat groter effect hebben maar meer dan 15 m³ gasbesparing per m² kas per jaar zal een warmtepomp niet kunnen realiseren. Kassen kunnen zeker tot nog lagere totaalverbruiken kunnen komen dan de 16 m³ die in het rapport 'Richtinggevende beelden' wordt genoemd, maar die additionele verlaging wordt dan niet veroorzaakt door de warmtepomp, maar door verbeteringen van kaseigenschappen (meerlaagse bedekkingsmaterialen, balansventilatie etc.).

Bij gebruik van het Klimrekscherm kan nog een kleine additionele besparing aan het scherm worden toegerekend wanneer het scherm ook 's nachts wordt gebruikt. Het warmteverlies van de kas zal immers iets afnemen als het scherm 's nachts wordt opgetrokken doordat er dan een extra verliesbeperkend oppervlak bij komt. De afdichting van dit scherm langs de bovenrand is echter beperkt zodat van zo'n scherm niet meer dan 10% energiebesparing verwacht mag worden indien het op het totale dekoppervlak zou worden toegepast. Het Klimrekscherm bestrijkt slechts de helft van het dekoppervlak en daarom wordt het warmtevraag beperkende effect van het Klimrekscherm op 1.5 m³ aardgas equivalenten per m² per jaar ingeschat. Echter, doordat de kas met een gasmotor aangedreven warmtepomp wordt verwarmd zal een vermindering van de warmtebehoefte voor minder dan de helft doorwerken in de vermindering van de gasbehoefte (het andere deel vertaalt zich in een vermindering van de regeneratiebehoefte van de aquifer).

In de tomatenteelt zal de toepassing van het Klimrekscherm en de daaraan gekoppelde inzet van de warmtepomp dus tot een gasbesparing van 12 m³ per m² per jaar in een energiezuinig gebruikte kas tot 16 m³ per m² per jaar in een minder energiezuinige kas leiden. In een potplantenteelt met een dubbel dek zal de gasbesparing rond de 10 m³ per m² per jaar uitkomen.

De geldswaarde van deze besparingen hangt uiteraard helemaal af van de gasprijs. Bij de bovengetoonde range van gasbesparingen ligt de waarde bij een gasprijs van 30 cent per m³ tussen de € 3,00 per m² per jaar en € 4,80 per m² per jaar. Bij een gasprijs van 50 cent per m³ komt de waarde van de energiebesparing tussen de € 5,00 en € 8,00 per m² per jaar te liggen.

Om de bovengenoemde energiebesparing te realiseren zal het scherm in de zomer veel warmte moeten verzamelen en dus intensief moeten worden gebruikt. In dat geval zal het niet volstaan om te wachten met het bevoeien van het scherm totdat er meer dan 500 W/m² globale straling is. Zeker in de tomatenteelt, waar de warmtebehoefte groter is en de warmteverzameling moeilijker gerealiseerd wordt zal de regeneratie van de aquifer met een Klimrekscherm dat voorzien is van het beste folie dat op de proefkas van Sjaak van Dijk werd gebruikt niet samengaan met een productiestijging. Als men veel gas wil besparen dan wordt de aquifer in de winter flink uitgekoeld en moet het scherm in de zomer 2200 uur besproeid worden en moet met een productievermindering van ongeveer 0.5 tot 1% rekening gehouden worden (zie Figuur 3.6). Als de tuinder een wat kleinere warmtepomp kiest zal de energiebesparing afnemen richting 12 m³, maar kan er met het Klimrekscherm (met de huidige folie-eigenschappen) ongeveer 1% productiestijging worden gerealiseerd. Zeker bij een hoge gasprijs zal de energiebesparing meer opleveren dan dat de productiederving kost (van 1% productiederving naar 1% productiewinst levert 80 cent voordeel op terwijl van 12 m³ naar 16 m³ besparing bij een gasprijs van 30 cent € 1,20 oplevert).

In de tomatenteelt moet er met de huidige schermmaterialen dus worden uitgegaan van een bedrijfseconomisch effect dat geheel en uitsluitend door de gasbesparing wordt gerealiseerd. De gasbesparing ligt tussen de 12 en 16 m³ en heeft dus een waarde tussen de € 3,60 en € 4,80 bij een gasprijs van 30 cent per m³ en een waarde van € 6,00 en € 8,00 bij een gasprijs van 50 cent per m³. Bij de hoogste energiebesparingrealisaties zal een productievermindering optreden ter waarde van ongeveer € 0,30. Dit kan evenwel gezien de relatief kleine impact hiervan op de totaalbedragen verder buiten beschouwing worden gelaten.

In de potplantenteelt in een kas met een dubbel dek gaat de warmteverzameling gemakkelijker en is de regeneratiebehoefte kleiner. Daar zou het scherm dus wat minder gebruikt hoeven worden en is een productietoename van 1% reëel (zie Figuur 3.10 en Figuur 3.11). Uitgaande van een gasbesparing van 10 m³ ten gevolge van het gebruik van de warmtepomp en een productwaarde van € 40 per m² in de periode maart t/m september is het financieel voordeel van het Klimrekscherm met de op dit moment voor handen zijnde eigenschappen € 3,40 bij een gasprijs van 30 cent en € 5,40 bij een gasprijs van 50 cent per m³.

Al de bovengenoemde besparingen op energiekosten gelden ten opzichte van een situatie waarbij de kas met een ketel wordt verwarmd.

De investeringen voor een kas met Klimrekscherm die verwarmd wordt door een warmtepomp, een WK en een aquifer belopen € 60,- per m². Dit bedrag volgt uit de kosten voor de aquifer (€ 300.000 voor de aquifer met een capaciteit van 60 m³ per ha per uur), een warmtepomp met een elektrisch vermogen van 200 kW per hectare (€ 100.000 per ha) een WK-installatie van 150 kW elektrisch per ha, inclusief rookgas reiniging (ook € 100.000 per ha). Voor de kosten voor het Klimrekscherm zijn nog geen praktijkgegevens beschikbaar maar deze zullen ongeveer € 10,- per m² bedragen.

In verhouding tot de te behalen besparing op energiekosten ligt dit kostenniveau erg hoog. Pas als de gasprijs in de buurt van de 50 cent per m³ komt te liggen zou de installatie in de buurt van een financieel haalbare situatie komen indien de installatie zou worden vergeleken met een bedrijf dat door een ketel wordt verwarmd.

Indien de kas met een Klimrekscherm wordt vergeleken met een bedrijf dat onder de huidige marktomstandigheden werkt met een netgekoppelde WK-installatie die teruglevert aan het net dan daalt de waarde van de gasbesparing substantieel. De afgelopen periode was de spark-spread (het verschil tussen de variabele kostprijs van de productie van elektriciteit en de waarde van de geleverde elektriciteit) zodanig dat WK-tuinders hun kassen de factor met vrijwel gratis afvalwarmte verwarmen. De waarde van de gasbesparing wordt in dat geval dus 0.

Indien het perspectief van het Klimrekscherm wordt vergeleken met een alternatief koelsysteem zoals luchtbehandelingskasten bovenin of onderin de kas dan hoeven alleen de meerkosten- en opbrengsten van die alternatieve systemen te worden beoordeeld. Immers, kosten voor een warmtepomp, aquifer en WKK zijn bij deze vergelijking gelijk.

Als we uitgaan van koelers die bovenin de kas worden opgehangen met een koelcapaciteit die vergelijkbaar is met die van het Klimrekscherm dan zou dit kunnen plaatsvinden met 1 koelunit per 150 m². De kosten van zo'n koelunit, inclusief de montage komen op zo'n € 15,- per m². De jaarkosten van de investering zullen met de vervanging van het Klimrekscherm door boven in de kas gemonteerde luchtbehandelingskasten ongeveer € 0,50 stijgen. Daarnaast zal het elektriciteitsverbruik van de kas door het gebruik van ventilator aangedreven koelers belangrijk stijgen (ongeveer 5 kWh per m² per jaar). Uitgaande van een elektriciteitsprijs van 12 cent per kWh (een stukje hoger dan de nu gebruikelijke kostprijs) betekent dit dat een alternatief gekoelde kas per jaar ongeveer € 1,10 duurder zal zijn).

Wanneer we echter bij vergelijking van de grafiek in Figuur 4.4 met de grafiek in Figuur 4.5 zien dat de gewasproductie in een kas die wordt gekoeld zonder de nadelige lichteffecten in de tomatenteelt 4% meer productie oplevert dan worden bij een gewasopbrengst ter waarde van 40 euro per m² (in de periode maart t/m september) de meerkosten van alternatieven volledig gecompenseerd.

Er moet dus worden geconcludeerd dat het Klimrekscherm zolang de optische eigenschappen van het folie niet verbeteren in de tomatenteelt geen additionele voordelen biedt ten opzichte van concurrerende koelsystemen.

In de potplantenteelt onder een dubbel dek ligt dit anders. Doordat de behoefte aan laagwaardige warmte in die teelt kleiner is en het effect van de lagere lichtdoorlatendheid minder hard doorwerkt weegt in de potplantenteelt de som van lagere investeringskosten en lagere elektriciteitsgebruikskosten wél op tegen de iets minder gunstige lichtomstandigheden.

Op dit moment is het gebruik van een warmtepomp in de potplantenteelt nog niet bedrijfseconomisch verantwoord, maar zodra dat wél het geval is zal de regeneratie van de aquifer met een Klimrekscherm te verkiezen zijn boven het gebruik van mechanisch geventileerde koelblokken.

5 Conclusies

Het Klimrekscherm vormt een koelsysteem waarmee een duidelijke vermindering van het ventilatieverlies van CO₂ kan worden gerealiseerd. Het warmte-onttrekkingsvermogen ligt qua ordegrrootte rond de 80 W/m², maar kan oplopen tot meer dan 125 W/m² bij een hoog sproeidebiet in een warme kas. Bij intensief gebruik van het scherm als koelsysteem kan de CO₂-concentratie zo'n 1500 uur per jaar 100 ppm hoger komen te liggen dan in een referentie waarin gelijke teeltomstandigheden worden nagestreefd, maar waarbij er geen koeling kan worden ingezet.

In een tomatenkas kan het scherm maximaal 15.5 m³ aardgasequivalenten aan warmte verzamelen in de vorm van water dat van 10°C wordt opgewarmd naar gemiddeld 19°C. Door deze warmte in een aquifer op te slaan kan in de winter een warmtepomp van warmte worden voorzien zodat de kas gedeeltelijk op duurzame energie kan worden verwarmd. Het gasverbruik van de kas kan dan met deze 15.5 m³ aardgas equivalenten afnemen, en doordat er ook nog een kleine beperking van de warmtebehoefte van de kas zal optreden wanneer het scherm 's nachts wordt opgetrokken wordt in de tomatenteelt een energiebesparing van 16 m³ per m² per jaar mogelijk. Wanneer als referentie echter een energiezuinige tomatenkas wordt gehanteerd (zuinige, met het buitenklimaat meebewegende klimaatinstellingen, een scherpe vochtbeheersing en een dubbel energiescherm) dan zakt de potentiële energiebesparing naar 12 m³.

Om een soortgelijke reden is voor de energiebesparing die in een met een dubbel dek uitgevoerde potplantenteelt gerealiseerd kan worden de energiebesparingpotentie op 10 m³ gesteld. Een met een dubbelwandig kasdek uitgevoerde potplantenteelt zal immers minder warmte behoeven dan een tomatenteelt.

Voor de potplantenteelt onder een dubbelwandig kasdek zal het Klimrekscherm zeker voldoende warmte kunnen verzamelen om de aquifer gedurende de zomer te regenereren. Het scherm zal in de potplantenteelt wat minder uren bevoeid worden, maar tijdens die uren met minder verliezen functioneren en dus meer warmte kunnen verzamelen.

Het koelvermogen van 80 tot 100 W/m² zoals die met het Klimrekscherm gerealiseerd kan worden is in de periode van maart t/m september goed voor een productiestijging van 3 tot 4%. Daarnaast geeft het scherm ook nog een productietoename van 1 tot 2% doordat het licht meer diffuus binnen komt.

Naast de bovengenoemde positieve prestaties laat het Klimrekscherm met de momenteel beschikbare materialen evenwel een behoorlijke beperking van de lichtdoorlatendheid van de kas zien. Vooral als het scherm bevoeid wordt (en dat is het grootste deel van de tijd waarin het scherm uitgetrokken is) treedt er door reflectie vanuit de condens- en sproeidruppels veel lichtverlies op. In de metingen is gekeken naar 3 schermmaterialen en de teeltkundige evaluatie is uitgevoerd met het scherm dat daarbij als beste uit de bus kwam (een helder folie).

Bij dit heldere folie treedt in de periode van maart t/m september een lichtverlies 5.5% op. Het (meestal) natte scherm leidde daarbij wel tot een grotere fractie diffuus licht in de kas. Bij intensief gebruik van het Klimrekscherm loopt de fractie diffuus licht in de kas op van 70% naar 77%.

Het overall effect van koeling, hogere diffusiviteit en lagere lichtintensiteit leidt bij een intensief gebruik van het scherm (dus wanneer het scherm wordt gebruikt zodra de kasluchttemperatuur boven de ventilatielijn uit komt) evenwel tot een afname van de productie met ongeveer 1%.

Als het scherm wat minder wordt gebruikt, en pas wordt opgetrokken en bevoeid als er meer dan 500 W/m² globale straling wordt gemeten dan overtreffen de voordelen van het scherm de nadelen van het lichtverlies en kan een netto productietoename van ongeveer 1% over de periode maart t/m september worden verwacht. De warmteverzameling wordt dan echter ook minder, zodat de eerder genoemde energiebesparingcijfers terugvallen naar waarden rond de 6 m³ per m² per jaar voor de tomatenteelt en 8 m³ per m² per jaar voor de potplantenteelt.

Indien de optische eigenschappen van de gebruikte folies gunstiger worden (dus wanneer het folie de condensdruppels direct laat uitvloeien, maar ook wanneer het (natte) folie in staat zou zijn NIR straling te reflecteren) wordt het perspectief uiteraard gunstiger. Vooral het beperken van de nadelen van de condensdruppels zal helpen. Op grond van de informatie die bij de uiteenrafeling van de effecten naar voren komt kan worden geconcludeerd dat het oplossen van het condensprobleem ongeveer 2% meer productie op zal leveren. Het effect van NIR-reflectie zal een additioneel koeffect leveren dat iets kleiner zal zijn het koeffect van het koude dekoppervlak. Het effect is enigszins speculatief maar er mag een extra productietoename van zo'n 3% van verwacht worden. Het is daarbij natuurlijk wel van belang dat de NIR-reflecterende kwaliteit behouden blijft op het moment dat het scherm bevoeid wordt.

De netto besparing op de jaarkosten van de kas (gaskosten minus gedeerde productie) in een kas met Klimrekscherm bij de op dit moment voor hande zijnde folie-materialen liggen bij een gasprijs van 30 cent per m³ tussen de € 3,00 (bij de potplanten) en € 4,80 (bij een tomatenteelt waar qua kas en klimaatinstellingen niet het onderste uit de kan wordt gehaald). Bij zeer energiezuinige teelten is de warmtevraag kleiner en zal dus de besparing die met het Klimrekscherm kan worden behaald afnemen.

Gezien de eerdergenoemde opmerkingen over het productie-effect van het scherm zal het duidelijk zijn dat deze netto besparing vrijwel uitsluitend bepaald wordt door het energiekosten-effect. Bij een gasprijs van 50 cent per m³ komt de waarde van de besparingen dan ook tussen de € 5 en € 8 per m² per jaar.

Afgezet tegen het investeringen die voor een installatie die nodig zijn om deze besparingen te realiseren, die ingeschat worden op € 60 per m², kan geconstateerd worden dat pas bij een gasprijs die rond de 50 cent per m³ een op een warmtepomp gebaseerd verwarmingssysteem binnen het bereik van financiële haalbaarheid komt.

Overigens heeft deze constatering weinig te maken met de specifieke eigenschappen van het Klimrekscherm aangezien de grootste investeringkosten liggen in de aanleg van de aquifer. De installatie van het Klimrekscherm beslaat slechts 16% van de investering.

Los van de hoge investeringen die gemoeid zijn met verwarmingssystemen die gebaseerd zijn op een warmtepomp speelt nog het bedrijfseconomische perspectief van alternatieve investeringsrichtingen. De genoemde energie-kostenbesparingen zijn gebaseerd op een referentie waarin de kas wordt verwarmd met een ketel.

In de huidige marktomstandigheden is het gebruik van een WK-installatie die elektriciteit levert ten behoeve van het openbare net evenwel een zeer belangrijke concurrerende investering waarmee de verwarmingskosten kunnen worden beperkt. Resultaten uit het verleden bieden geen garanties voor de toekomst, maar de afgelopen paar jaar was de waarde van elektriciteit zodanig dat bij goede gas inkoop en elektriciteit verkoop contracten de reële kosten voor warmte onder de € 5 per GJ lagen. Dit betekent dat de waarde van een m³ besparing op gas niet meer dan 16 cent bedroeg en dus behoorlijk onder de marktwaarde van gas lag.

De ontwikkeling van de spark spread (het verschil tussen de kosten voor inkoop van gas en de waarde van elektriciteit) naar de toekomst blijft onzeker, maar het mag voorlopig verwacht worden dat bij een stijgende gasprijs ook de waarde van elektriciteit zal stijgen. De waarde van de besparing op gasverbruik zal, met de WK als alternatief, dan belangrijk kleiner blijven dan de prijs van gas.

Als het Klimrekscherm wordt vergeleken met alternatieve koelmethode, zoals bijvoorbeeld boven in de kas aangebrachte luchtbehandelingskasten, dan blijken de jaarkosten voor luchtbehandelingskasten ongeveer € 1,10 hoger dan die voor het Klimrekscherm. Omdat deze luchtbehandelingskasten echter de lichttoetreding tot de kas niet hinderen (de onderschepping van de constructiedelen die met deze apparaten gemoeid is zal niet groter zijn dan de vaste constructiedelen van het Klimrekscherm) komt de productie in de kas hoger uit. Voor een tomatenkas komt het simulatiemodel op een 4% hogere productie in de periode van 1 maart tot 1 oktober. Indien de productwaarde in die periode € 30 per m² bedraagt is het productievoordeel groter dan de meerkosten van luchtbehandelingskasten. Zolang de optische eigenschappen van het Klimrekscherm niet verbeteren ten opzichte van eigenschappen die in de proefkas gemeten zijn (10% transmissieverlies door een droog scherm en additioneel 8% verlies bij bevoeiing)

vormt het Klimrekscherm voor de tomatenteelt, hoewel aantrekkelijk door zijn eenvoud, geen alternatief voor het gebruik van de gangbare luchtbehandelingskasten als warmtebron voor de regeneratie van een aquifer.

In de potplantenteelt onder een dubbelwandig kasbedekkingsmateriaal, waar het lichtverlies minder nadelig is en waar er minder warmte voor de regeneratie van de aquifer nodig is, weegt de goedkopere aquifer regeneratie-capaciteit van het Klimrekscherm wél op tegen de kleine productiedaling. Ook in de potplantenteelt is echter de besparing op gaskosten zodanig klein dat een op een warmtepomp gebaseerd verwarmingssysteem in de huidige marktsituatie bedrijfseconomisch onverantwoord is. Dit is onafhankelijk van de vraag of de regeneratie van de aquifer met het Klimrekscherm plaatsvindt of met mechanisch geventileerde koelers.

6 Samenvatting

Het Klimrekscherm concept beoogt door een combinatie van techniek en materiaalkeuze op een goedkope manier enige koeling in de kas te realiseren en de lichtomstandigheden in de kas te verbeteren. Daarnaast wordt met het koelen van de kas warmte verzameld voor de regeneratie van een aquifer die in de winter wordt gebruikt als warmtebron voor een warmtepomp. Daarmee kan het Klimrekscherm substantieel bijdragen aan de verduurzaming van de glastuinbouw.

Teneinde de prestatie en perspectieven van het Klimrekscherm te bepalen zijn metingen aan een proefkas van 20 bij 20 meter uitgevoerd en zijn de resultaten hiervan door middel van een simulatiestudie doorgetrokken naar de tuinbouwpraktijk. Dit onderzoek is gefinancierd door het Productschap Tuinbouw en het Ministerie van Landbouw Natuur en Voedselkwaliteit in het kader van het onderzoeksprogramma Kas Als Energiebron.

Het Klimrekscherm is een beweegbaar element in de kas die naar believen kan worden opgetrokken of kan worden opgeborgen. In opgeborgen toestand zit het scherm in een cassette die vlak onder de goot gemonteerd is. In zonnige omstandigheden kan het scherm langs de zuidelijke dakhelft aan de binnenzijde van de kas worden opgetrokken. Op deze manier valt vooral het directe licht door het scherm en kan dit directe licht worden gediffuseerd.

Als het in de kas te warm wordt kan het scherm met koud water worden besproeid. De helft van het kasdek wordt hiermee een koud oppervlak zodat de kaslucht ermee wordt gekoeld. Bij dit koelen van de kas warmt het sproeiwater op en met dit opgewarmde water kan een aquifer worden geregenereerd. Het koelvermogen dat op deze manier gerealiseerd wordt hangt uiteraard sterk van de kasluchtomstandigheden af en van de temperatuur waarmee men het water wil laten afstromen. Bij een sproeiwatertemperatuur van 10°C en een gemiddelde afstroomtemperatuur van 19°C komt het koelvermogen bij een kas van 27°C rond de 80 tot 100 W/m² te liggen.

Bij het besproeien van het Klimrekscherm in de proefkas ontstonden er veel druppels op het folie, uiteraard door het sproeien, maar ook door condensvorming. Deze druppels gaven een positieve bijdrage aan de diffusiviteit van het kasdek (op een strakblauwe dag bestond het licht in de kas voor 60% uit diffuus licht), maar leidden tevens tot een extra verlaging van de lichtdoorlatendheid van het Klimrekscherm. De metingen geven aan dat de lichttransmissie aan de zuidzijde van het kasdek bij het optrekken van het scherm met 10% afneemt en bij het besproeien van het dek met nog eens 8%. Aangezien het scherm meestal besproeid wordt als het wordt opgetrokken kan gesteld worden dat het scherm bij gebruik de lichttransmissie over de helft van de kas met 17% laat afnemen en dus met ongeveer 8.5% per m² kas.

Tegenover dit nadeel staat echter het voordeel van het diffuserende effect van het scherm en vooral het voordeel van het koelende effect. Wanneer de verschillende effecten met behulp van een simulatiemodel uiteengezeld worden dan blijkt dat bij lage lichtintensiteiten (tot 500 W/m²) het (besproeide) Klimrekscherm een netto negatief effect heeft op de productie en bij hogere intensiteiten de positieve effecten overheersen. Uiteraard geldt deze constatering uitsluitend voor het foliemateriaal dat in de proefkas aanwezig was. Bij gebruik van materialen met een hogere lichtdoorlatendheid, een hogere diffusiviteit en een coating die condens doet uitvloeien zal de lichtintensiteit waarboven de positieve effecten gaan overheersen naar beneden schuiven.

Indien het Klimrekscherm met de op dit moment beschikbare eigenschappen in de tomatenteelt wordt ingezet zo gauw de kasluchttemperatuur boven de ventilatielijn komt dan verzamelt het scherm genoeg warmte om de aquifer te regenereren, maar loopt de productie iets terug (0.5 tot 1% in de periode maart t/m september). Als er minder nadruk wordt gelegd op het verzamelen van duurzame energie, maar het scherm (met de huidige eigenschappen) wordt gebruikt indien er meer dan 500 W/m² straling is dan zal het in de tomatenteelt leiden tot een productiestijging van 1% over de periode van maart t/m september.

In de potplantenteelt gaat het verzamelen van voldoende warmte voor de regeneratie van de aquifer wel samen met het realiseren van een kleine productietoename. Dit komt vooral omdat voor de potplantenteelt wordt uitgegaan van een dubbelwandig kasdek, waardoor er minder verwarming nodig is en er dus ook minder warmte voor het regenereren van een aquifer nodig is.

Vanuit bedrijfseconomisch oogpunt blijkt het Klimrekscherm met de huidige eigenschappen perspectieven te gaan bieden bij gasprijzen in de buurt van de 50 cent per m³. Bij dit prijsniveau ligt de waarde van de gasbesparing tussen de € 5,40 en € 8,00 (afhankelijk van de teelt en de gekozen referentie) ten opzichte van een situatie waarin de kas met een ketel wordt verwarmd en er bij een gasprijs van 50 cent per m³ met verwarmingskosten van € 16 per GJ gerekend mag worden.

Het feit dat het koelende Klimrekscherm pas bij zulke hoge gasprijzen aantrekkelijk wordt komt niet zozeer door de kosten van het scherm (het scherm is een goedkoper koelsysteem in vergelijking met luchtbehandelingskasten), maar door de hoge kosten van een op duurzame energie gebaseerd verwarmingssysteem in het algemeen. Vooral de kosten van de aanleg van een aquifer drukken zwaar op de investering en leiden tot lange terugverdientijden.

Hier komt nog bij dat er op dit moment een zeer belangrijke concurrerend systeem voor handen is dat de stookkosten voor kassen substantieel kan verlagen en dat is de netgekoppelde WKK. Op dit moment leidt het gebruik van WKK tot een warmteprijs van rond de € 5 per GJ en zolang de waarde van elektriciteit meebeweegt met de kostprijs van gas zal de warmteprijs slechts zeer beperkt oplopen met de gasprijs.

Tenslotte is nog een vergelijking gemaakt tussen het Klimrekscherm en een koelsysteem dat gebaseerd is op luchtbehandelingskasten. Dit laatste systeem leidt, wanneer alle overige zaken (aquifer, warmtepomp, koelcapaciteit) gelijk worden gehouden, op jaarbasis tot ongeveer 1 euro hogere kosten per m² dan een systeem op basis van het Klimrekscherm. 1 Euro hogere kosten kunnen gecompenseerd worden met 3% hogere gewasopbrengsten. In de tomatenteelt is op grond van deze overweging een systeem op basis van luchtbehandelingskasten aantrekkelijker dan een Klimrekscherm (uiteraard ook hier weer uitgaande van de momenteel beschikbare folie-eigenschappen). Indien de optische folie-eigenschappen verbeteren, bijvoorbeeld door een goede uitvloeiing van condensdruppels met behoud van de verhoogde diffusiviteit of door goede NIR-reflecterende eigenschappen, zal een goedkoop systeem als het Klimrekscherm voor een kas waar slechts beperkt gekoeld wordt aantrekkelijker kunnen worden dan een op luchtbehandelingskasten gebaseerd koelsysteem (met een koelvermogen van 80 tot 100 W/m²).

In de teelt van Ficus onder een dubbel kasdek (wat in dit rapport model stond voor de potplantenteelt) zal een Klimrekscherm ook met de op dit moment voor handen zijnde folie-eigenschappen aantrekkelijker zijn dan het gebruik van luchtbehandelingskasten indien zo'n Klimrekscherm is bedoeld als goedkope warmtebron voor de regeneratie van een aquifer.

Het bedrijfseconomisch perspectief van welk op duurzame energie gebaseerd systeem dan ook blijft echter ongunstig zolang de waarde van warmte niet in de buurt van € 16 per GJ komt. Zolang het gebruik van WK de perspectieven blijft bieden zoals die op dit moment zijn ligt de waarde van warmte niet boven de € 5 per GJ en is die waarde ook nog eens in hoge mate ontkoppeld van de gasprijs. Systemen waarin zomerse warmteoverschotten aan de kaslucht worden onttrokken zijn in deze marktomstandigheden uitsluitend in beeld wanneer er productie-(waarde) verbeteringen met een waarde van 6 tot 8 € per m² per jaar in het vooruitzicht liggen.

Literatuur

Poot, E., H.F. de Zwart, J.C. Bakker, G.P.A. Bot, A. Dieleman, A. de Gelder, L.C. Marcelis & D. Kuiper, 2008.
Richtinggevende beelden voor energiezuinig telen in semigesloten kassen. Nota 568; Wageningen UR
Glastuinbouw.

Zwart, H.F., 2007.

Quicksan naar de koel- en bevochtigingscapaciteit van het bevoeid Klimrekscherm, Rapportage in opdracht van Syntens, Rijswijk.

Bijlage I.

Kas en teeltbeschrijving Tomaat

Inleiding

De tomatenteelt is al jaren de grootste subsector in de Nederlandse glasgroententeelt. Er is een tendens om ook in de tomatenteelt belichting te gaan gebruiken, maar door de bank genomen is de tomatenteelt in hoofdzaak een onbelichte teelt.

Kas

Moderne groentekassen worden opgetrokken uit units van ongeveer 4 ha bij een goothoogte van 5 meter. De gangbare traliemaat is 8 meter (2 kappen van 4 meter) en de pootafstand is 4.5 meter.

Het verwarmingssysteem is opgebouwd uit 51 mm buizen in het ondernet, die tevens dienst doen als transportnet. Op een tralie van 8 meter liggen 10 van deze buizen. Daarnaast hangen er nog half zoveel 28 mm buizen in een bovennet. Het bovennet fungeert als condensornet, maar ook als secundair net wanneer een groot verwarmingsvermogen noodzakelijk is. De buistemperaturen zijn begrensd op 75 en 60 °C voor respectievelijk het onder- en boven-net.

De kas is uitgerust met een rookgas-verdeelsysteem voor de CO₂-dosering waarmee maximaal 180 kg CO₂ per ha per uur kan worden toegediend.

In een referentiesituatie wordt uitgegaan van een ketel met een capaciteit van 120 m³aardgas/(ha uur) en er is een warmte-opslag buffer met een waterinhoud van 120 m³/ha.

Gewas- en teeltgegevens

Tomaat wordt in de regel halverwege december geplant, hoewel het met de stijgende energiekosten goed mogelijk is dat geconcludeerd moet worden dat het opschuiven van de plantdatum en het verkorten van de teeltduur wellicht tot een beter overall financieel rendement leidt. Gangbaar is zo'n verkorte teelt echter op dit moment niet en daarom wordt in deze scenarioberekening uitgegaan van een plantdatum in week 50 en een ruimdatum in week 47. De kas staat dus 3 weken leeg.

Kasklimaat

Tomaat wordt bij planten overdag vrij warm geteeld (20°C), maar mag in de voornacht ver wegzakken (naar 16°C). In de nacht (vanaf 23:00) wordt weer een iets hogere temperatuur aangehouden, 17°C. Vanaf maart worden de drie hierboven temperaturen een graad verlaagd. De etmaal gemiddelde temperatuur in de kas zal evenwel eerder hoger dan lager worden omdat koudere nachtperiode steeds korter wordt en ook omdat overdag de temperatuur steeds vaker en verder boven de stooklijn komt te liggen.

Als de stralingsintensiteit van de zon boven de 100 W/m² komt wordt de stooklijn met 2°C verhoogd over het traject van 100 tot 300 W/m².

In het begin van de teelt staat de ventilatielijn ver boven de stooklijn (3°C hoger) om ervoor te zorgen dat de etmaaltemperatuur automatisch oploopt met het lichtaanbod. Later in het jaar, vanaf 15 februari wordt dit terug gebracht tot 1°C en vanaf 15 maart wordt de stooklijn zelfs maar 0.5°C boven de de stooklijn gelegd. Dit is om te voorkomen dat de de etmaaltemperaturen te ver oplopen en de plantbalans uit het lood raakt.

Doordat de ventilatielijn is gekoppeld aan de stooklijn loopt deze met dezelfde stralingsverhoging als de stooklijn op bij toenemende lichtintensiteit.

Er wordt spaarzaam gebruik gemaakt van de minimumbuis. Alleen rond zonop wordt een minimumbuis van 40 tot 50°C aangehouden. Overdag wordt de minimumbuis afgebouwd over het stralingstraject van 100 tot 250 W/m² en 's nachts wordt een minimumbuis van 30°C aangehouden.

Er wordt ingegrepen op de luchtvochtigheid wanneer de kaslucht boven de 85% RV komt. De regelactie is beperkt, met name als het buiten koud is, namelijk 2% raamopening per % overschrijding van de RV wanneer het buiten kouder dan 5°C is. Als het buiten warmer dan 12°C is wordt het raam met 4% per % overschrijding op de RV geopend.

De CO₂-dosering vindt plaats door middel van ketelrookgassen van zonopkomst tot een uur voor zonsondergang. De doseersnelheid is 180 kg/uur, maar wordt getemperd indien de bijbehorende warmteproductie tot een warmteoverschot zou leiden. Anders gezegd: de buffer wordt zodanig gevuld dat er tijdens de gehele doseerperiode CO₂ gedoseerd kan worden. De warmtevraag is daarmee leidend voor de CO₂-dosering.

Het setpoint voor de CO₂-concentratie in de kas is 900. Overigens zullen deze concentraties niet gehaald worden wanneer er serieus op temperatuur gelucht moet worden.

Er wordt 's nachts een transparant beweegbaar scherm type SLS 10 ultra plus gebruikt als de buiten kouder is dan 12°C. Het scherm wordt in het koude deel van het jaar geopend als er meer dan 50 W/m² straling is.

In de warmere perioden (vanaf 1 maart) gaat het scherm bij het eerste ochtendlicht al open. Wanneer de RV minder dan 0.5% onder het setpoint komt wordt het scherm op een vocht-kier van 4% getrokken en bij blijvend te hoge RV wordt het scherm na een half uur geheel geopend. Het transparante scherm wordt niet als schaduw-scherm ingezet. In de gevel is een beweegbaar gevelscherm geplaatst, dat gelijktijdig met het horizontale scherm geopend en gesloten wordt.

Bijlage II.

Kas en teeltbeschrijving Ficus

Inleiding

De ficus is een warm geteelde tropische plant. Omdat in de potplantenteelt weinig nadruk wordt gelegd op een hoge lichtdoorlatendheid van de kas zijn potplantenkassen vaak met een dubbelwandig kasdek materiaal bedekt.

Kas

Potplantenkassen worden meestal in de vorm van breedkappers gebouwd. Vooral bij gebruik van dubbelwandige kunststof kanaalplaten kunnen brede kappen uit één stuk worden gebouwd wat de breedkapper interessant maakt. Het Klimrekscherm zou met enige modificaties ook in een breedkapper kunnen worden gemonteerd, maar het is ook heel goed denkbaar dat Ficussen in een Venlo-type warehouse worden geteeld.

Het verwarmingssysteem is opgebouwd uit 51 mm buizen in een bovennet en een klein verwarmingsnet onder de tafels of in de betonvloer (afhankelijk van de gekozen kasinrichting).

Er wordt in de potplantenteelt weinig CO₂ gedoseerd zodat er in de berekeningen wordt uitgegaan van een doseercapaciteit van maximaal 100 kg CO₂ per ha per uur. De CO₂ is afkomstig van de ketel, die hiervoor wordt ingezet van zonopkomst tot een uur voor zonsondergang. De branderstand wordt evenwel getemperd als de buffertemperatuur te snel oploopt. Er wordt gestreefd naar een CO₂-concentratie van 600 ppm, maar omdat de warmtevraag beperkt is zal die vaak niet worden gerealiseerd.

Ten behoeve van de CO₂-dosering is een buffer geïnstalleerd met een inhoud van 80 m³/ha.

Gewas- en teeltgegevens

De Ficus-teelt is een jaarrond teelt.

Kasklimaat

Ficus wordt geteeld bij een stooklijn van 20°C overdag en 19°C 's nachts. De ventilatielijn staat vrij ruim boven de stooklijn; op 23°C. Er wordt geen gebruik gemaakt van een lichtafhankelijke setpointverhoging.

Er wordt geen gebruik gemaakt van een minimumbuis en er worden hoge luchtvochtigheden getolereerd. De ramen worden pas geopend wanneer de luchtvochtigheid boven de 90% komt.

Er wordt een transparant beweegbaar scherm type SLS 10 ultra plus gebruikt wat 's nachts wordt gesloten als het buiten kouder is dan 12°C. 's ochtends wordt het geopend als er buiten meer dan 25 W/m² licht is.

